



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

**Stavební fakulta
Katedra hydrauliky a hydrologie**

Dynamika srážek na malém urbanizovaném povodí

Bakalářská práce

Precipitation Dynamics in Small Urbanized Catchment

Bachelor Thesis

Studijní program: Stavební inženýrství

Studijní obor: Inženýrství životního prostředí

Vedoucí práce: Ing. Michal Dohnal, Ph.D.

Veronika Mikešová

Praha 2016



ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

studijní program: Stavební inženýrství
studijní obor: Inženýrství životního prostředí
akademický rok: 2015/2016

Jméno a příjmení studenta: Veronika Mikešová
Zadávací katedra: K141 - Katedra hydrauliky a hydrologie
Vedoucí bakalářské práce: doc. Ing. Michal Dohnal, Ph. D.
Název bakalářské práce: Dynamika srážek na malém urbanizovaném povodí
Název bakalářské práce
v anglickém jazyce: Precipitation dynamics in a small urbanized catchment

Rámcový obsah bakalářské práce: Zpracujte přehled způsobů měření a detekce srážek. Z měření překlopnými srážkomery posuďte variabilitu srážek na povodí v Letňanech. V uzlovém bodě povodí proveďte srovnání měření srážek překlopným průtokoměrem, laserovým detektorem srážek a detekce srážek pomocí pro tyto účely nestandardních sensorů- LWS a TMS.

Datum zadání bakalářské práce: 22. 2. 2016 Termín odevzdání: 22. 5. 2016
(vyplňte poslední den výuky příslušného semestru)

Pokud student neodevzdal bakalářskou práci v určeném termínu, tuto skutečnost předem písemně zdůvodnil a omluva byla děkanem uznána, stanoví děkan studentovi náhradní termín odevzdání bakalářské práce. Pokud se však student řádně neomluvil nebo omluva nebyla děkanem uznána, může si student zapsat bakalářskou práci podruhé. Studentovi, který při opakovaném zápisu bakalářskou práci neodevzdal v určeném termínu a tuto skutečnost řádně neomluvil nebo omluva nebyla děkanem uznána, se ukončuje studium podle § 56 zákona o VŠ č. 111/1998. (SZŘ ČVUT čl. 21, odst. 4)

Student bere na vědomí, že je povinen vypracovat bakalářskou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v bakalářské práci.

vedoucí bakalářské práce

vedoucí katedry

Zadání bakalářské práce převzal dne: 11. 2. 2016

student

Formulář nutno vyhotovit ve 3 výtiscích – 1x katedra, 1x student, 1x studijní odd. (zašle katedra)

Nejpozději do konce 2. týdne výuky v semestru odešle katedra 1 kopii zadání BP na studijní oddělení a provede zápis údajů týkajících se BP do databáze KOS.

BP zadává katedra nejpozději 1. týden semestru, v němž má student BP zapsanou.

(Směrnice děkana pro realizaci studijních programů a SZZ na FSv ČVUT čl. 5, odst. 7)

Abstrakt

Tato práce porovnává několik různých přístrojů, sloužících k detekci a měření srážek. Zpracována a porovnávána byla data z překlopných srážkoměrů, laserového detektoru srážek a dvou nestandardních přístrojů, senzorů primárně určených k měření vlhkosti. Těmito přístroji jsou Leaf Wetness Sensors (LWS) od společnosti Decagon Devices Inc. a čidla TMS od společnosti TOMST s. r. o. Pro každý přístroj byla zvolena kritéria, podle nichž byly hledány přesné počátky a konce srážkových epizod. U senzorů vlhkosti byla analyzována doba schnutí. Všechny přístroje byly instalovány v povodí Mratínského potoka v Praze Letňanech. Celkem bylo na povodí instalováno 7 překlopných srážkoměrů, jejichž data umožnila posouzení variability srážek. Analýza dat z různých přístrojů na jedné lokalitě ukázala, že pro vhodně nastavená kritéria, lze k detekci srážek použít i přístroje k tomuto účelu nestandardní a provozně méně náročné, tj. senzory LWS a TMS.

Klíčová slova

překlopné srážkoměry, intenzita srážek, čidlo vlhnutí listu, doba trvání srážky, laserový detektor srážek, městská hydrologie

Abstract

In this thesis, several different instruments for rainfall measurement are compared. Measured data have been analyzed and compared for tipping bucket rain gauge, laser precipitation monitor, and two unusual instruments primarily used for the measurement of humidity; namely Leaf Wetness Sensors (LWS) from the Decagon Devices Inc. and sensor TMS from the TOMST Ltd. Criteria for an exact detection of beginnings and ends of precipitation episodes have been developed for each type of instrument. Moreover, for the humidity sensors drying times have been analyzed. All instruments have been situated in a catchment area of Martínský stream in Letňany, Prague. Seven tipping bucket rain gauges have been installed in the catchment area to analyze its rainfall variability. Finally, the data obtained from the different instruments installed in the same range have been analyzed. This analysis has shown that even the humidity detectors LWS and TMS with lower operational demands can be used for the rainfall detection if the criteria are set up properly.

Keywords

tipping bucket rain gauge, rainfall intensity, leaf wetness sensor, rainfall duration, laser precipitation monitor, urban hydrology

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracovala samostatně pouze za odborného vedení vedoucího práce doc. Ing. Michala Dohnala, Ph.D. Dále prohlašuji, že veškeré podklady, ze kterých jsem čerpala, jsou uvedeny v seznamu použité literatury.

Souhlasím s užitím tohoto školního díla ve smyslu §60 Zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon).

V Praze dne 20. 5. 2016

Veronika Mikešová

Poděkování

Na tomto místě bych ráda poděkovala panu doc. Ing. Michalovi Dohnalovi, Ph.D. za jeho odborné vedení, řadu cenných rad a užitečných připomínek. Při zpracování bakalářské práce bylo využito měření a poznatků získaných v rámci projektu Grantové agentury České republiky 14-22978S. Poděkování za poskytnutá srážkoměrná data patří také společnosti Pražské vodovody a kanalizace, a.s.

Obsah

1	Úvod.....	9
1.1	Motivace výzkumu	9
1.2	Cíl práce	9
2	Rešerše literatury.....	10
2.1	Srážkoměrné přístroje.....	10
2.2	Použité měřicí přístroje	12
2.2.1	Laserový detektor srážek	12
2.2.2	Překlopné srážkoměry, Fiedler.....	13
2.2.3	Leaf Wettness Sensors, Decagon Devices Inc.....	14
2.2.4	TMS stanice.....	15
3	Popis povodí a datových souborů	17
3.1	Experimentální povodí Letňany	17
3.1.1	Data z překlopných srážkoměrů.....	17
3.2	Datový soubor.....	18
3.2.1	Uzlový bod povodí.....	19
4	Analýza dat.....	20
4.1	Výpočet teploty rosného bodu	20
4.1.1	Postup výpočtu rosného bodu.....	20
4.1.2	Analýza vypočtených teplot rosného bodu	20
4.2	Odhad potencionální evapotranspirace	21
4.2.1	Výpočet.....	21
4.3	Zpracování dat ze senzorů TMS.....	22
4.3.1	Srovnání senzorů TMS	23
4.3.2	Identifikace počátků padajících srážek.....	25
4.3.3	Identifikace doschnutí čidla.....	27
4.3.4	Identifikace konců dešťů	29
5	Výsledky a diskuze.....	31
5.1	Extraterestriální radiace a odhad výparu.....	31
5.2	Zpracování dat z překlopných srážkoměrů	34
5.2.1	Data duplicitních srážkoměrů	34
5.2.2	Srovnání všech srážkoměrů	39
5.3	Uzlový bod povodí.....	43
5.3.1	Začátek srážky.....	43
5.3.2	Konec srážky.....	45

5.3.3	Schnutí čidel LWS a TMS.....	46
5.4	TMS.....	47
6	Závěr.....	48
7	Seznam obrázků.....	50
8	Seznam tabulek.....	52
9	Reference.....	54

1 Úvod

Měření srážek je v hydrologii velmi důležitou disciplínou. Data získaná tímto monitorováním slouží jako vstup ve srážkoodtokovém modelování. Srážky, jejich intenzita a průměrné množství v dané oblasti jsou důležitou charakteristikou pro nakládání s vodami a zemědělství.

1.1 Motivace výzkumu

Podstatou práce je především posouzení vhodnosti čidla k určování vlhkosti listoví LWS (Leaf Wettness Sensor, Decagon Devices Inc.) a čidla půdní vlhkosti TMS (TMS model, TOMST s. r. o.) k detekci srážek. K posouzení je využito nejen vzájemného srovnání, ale také srovnání s klasickým překlopným srážkoměrem a laserovým detektorem srážek. Důležité je získání přehledu o technických možnostech jednotlivých přístrojů a zhodnocení jejich použitelnosti k detekci srážek a ranních ros.

Použití nestandardních senzorů, jako jsou LWS a TMS, pro detekci srážek je velmi atraktivní, protože jejich cena je nízká, a proto umožňují zkoumání prostorové variability. Jinými slovy lze říci, že za relativně nízkou cenu lze těchto přístrojů umístit do prostoru dostatečné množství, aby bylo možné posoudit prostorovou variabilitu zkoumané veličiny - srážky. Otázkou zůstává, jsou-li na to tyto levné přístroje vhodné. Zda poskytují relevantní informaci o srážkách, nebo spíše jaké informace nám tyto přístroje dokážou poskytnout. Jaké mají jednotlivé přístroje výhody a jaké mají naopak nevýhody.

Senzory LWS a TMS jsou dále zajímavé potenciálem směrem k určení doby, kdy byla na vegetaci držena voda, a tudíž neprobíhala transpirace - výpar z rostlin. Pokud po známou dobu neprobíhá transpirace, změní se rozdělení evapotranspirace během dne. To může hrát významnou roli, například při studiu toků v systému půda-rostlina-atmosféra.

Všechna tato porovnávání jsou následně dále využitelná pro studium vlnnutí antén mikrovlnných spojů, pevných spojů mobilních operátorů. Tyto spoje jsou stále častěji využívány k predikci intenzity srážek v městských aglomeracích, s následnou vazbou na městské inženýrství a městskou hydrologii. Zmiňované vlnnutí vysílačů ovlivňuje vysílaný mikrovlnný signál podobně jako srážková událost a odlišení těchto jevů je proto zajímavé výzkumné téma.

1.2 Cíl práce

Hlavním cílem práce je především vypracovat přehled způsobu měření a detekce srážek. Dále z měření překlopnými srážkoměry posoudit variabilitu srážek na povodí Letňany a v uzlovém bodě povodí vypracovat podrobnější porovnání, srovnání měření srážek různými přístroji, které byly k dispozici. Dostupnými přístroji jsou překlopný průtokoměr, laserový detektor srážek a dva senzory, pro tyto účely nestandardní, a to LWS a TMS.

2 Rešerše literatury

Existuje celá řada studií zabývajících se srovnáváním principiálně rozdílných přístrojů měřící srážky. Například článek Liu et al (2013) [1] srovnává překlopný srážkoměr (TBRG), váhový srážkoměr, optický srážkoměr, detektor stavu počasí, Jossův-Waldvogelův disdrometr a 2D video disdrometr. Podkladem pro porovnání přístrojů byla měřená doba trvání srážky, intenzita deště a celkový srážkový úhrn. K analýze Liu et al. (2013) použili lineární regresi. Výsledkem jejich studie je velmi dobrá shoda měření optického srážkoměru a Jossova-Waldvogelova disdrometru. Odchyly měření překlopného srážkoměru a video disdrometru od těchto dvou přístrojů se pohybují do 5 %. Nejhorší shodu vykazuje měření produkované detektorem stavu počasí s váhovým srážkoměrem, zde jsou odchyly měření větší než 20 %. Při srážce s intenzitou větší než 20 mm/h video disdrometr a detektor stavu počasí srážku nadhodnotily. Jossův-Waldvogelův disdrometr ji naopak podhodnotil. Při dešti o nižších intenzitách jsou přesnější optický srážkoměr a video disdrometr přesnější než klasické srážkoměry.

Další studie zabývajících se srovnáváním různých přístrojů k měření a detekci srážek Lanza a Vuerich (2009)[2] porovnává data z překlopných, váhových srážkoměrů, optických disdrometrů, akustických detektorů srážek, tlakového senzoru, senzoru výškového a z Dopplerova mikro-radaru. Ve studii jsou použita minutová data. Pro překlopné srážkoměry byly navrženy algoritmy, které odstraňují systematické chyby měření. Tak vznikly dvě skupiny dat, data upravená a neupravená. Váhové srážkoměry autoři rozdělili na přístroje s dobrou a špatnou dynamickou stabilitou, protože dynamické charakteristiky mohou být považovány za nejkritičtější faktor při ovlivňování naměřené intenzity deště. Nejpřesnější z analýzy vyšla upravená data z překlopných srážkoměrů a váhové srážkoměry s nejkratším krokem měření. Optické disdrometry v průměru srážky nadhodnocovaly.

2.1 Srážkoměrné přístroje

K měření a detekci srážek se obecně využívají srážkoměry, neboli hietometry. Existují různé druhy srážkoměrů. Nejpoužívanější je srážkoměr překlopný. Překlopné srážkoměry nabízí například společnost Meteoservis (Obr. 1) [3], nebo společnost Fiedler (kapitola 2.2.2 Překlopné srážkoměry, Fiedler) [5].



Obr. 1: Srážkoměr s překlápěcím člunkem MR2H se záchytnou plochou 200 cm². Vyobrazení převzato z manuálu Meteoservis [3].

Překlopné srážkoměry mohou mít různou zachytnou plochu, nejčastěji 200 nebo 500 cm². Dále mohou mít různé rozlišení, tedy množství srážek, při němž dojde k překlopení člunku, 0,1, 0,2, nebo 0,5 mm.

Dalším hojně využívaným srážkoměrem je srážkoměr váhový. Např. od firmy Meteoservis (Obr. 2) [3].



Obr. 2: Váhový srážkoměr MRW500. Fotografie z manuálu výrobce Meteoservis, Vodňany [3].

Váhový srážkoměr je určen k měření tekutých i tuhých srážek. Je složen ze dvou nádob. Transport kapalin z jedné nádoby do druhé je zajištěn čerpadlem. V horní nádobě se zachytávají padající srážky. Obsahuje nemrznoucí kapalinu, díky níž se zde mohou tuhé srážky rozpouštět. V této nádobě je také vrstva silikonového oleje, která zabraňuje vypařování srážek. Horní nádoba je vážena tenzometrickou vahou, která je připojená na řídicí jednotku a umožňuje kontinuálně vyhodnocovat měření srážek. Spodní nádoba je akumulací. Objem této nádoby je 70 litrů. To odpovídá množství 1 400 mm srážek.

Dalším často využívaným přístrojem je přístroj, který neposkytuje informaci o intenzitě srážky, ale pouze zda v danou chvíli srážka probíhá. Tento přístroj je nazýván detektor srážek, např. detektor deště RDH11 firmy Fiedler (Obr. 3) [4].



Obr. 3: Detektor deště RDH11. Vyobrazení převzato z manuálu Fiedler [5].

Detektor deště RDH11 detekuje srážky kapalně i sněhově. Po dobu deště je aktivován binární výstup detektoru. K detektoru je připojena záznamová jednotka, do které lze ukládat dobu trvání

srážky Během srážky je detektor vytápěn tak, aby jeho teplota o několik stupňů přesahovala teplotu okolí.

2.2 Použité měřicí přístroje

V této kapitole jsou uvedeny a podrobněji popsány konkrétní přístroje, ze kterých byla k dispozici data k analýze srážek na povodí v Praze Letňanech.

2.2.1 Laserový detektor srážek

Laserový detektor srážek (laser precipitation monitor, LPM) je přístroj vhodný pro měření a detekci různých typů srážek. Rozeznává tyto typy srážek: slabé mrholení, mírné/ husté mrholení, slabé mrholení se slabým deštěm, slabý déšť, mrholení se sněhem, mírný /silný déšť, sněhová zrna, slabé sněžení, měkké kroupy, ledová zrna, kroupy, neznámá srážka nebo bez srážek.

Informace o tomto přístroji jsou převzaty z manuálu poskytovaného výrobcem Thies Clima [10]. Přístroj rozeznává 20 rychlostí padajících vodních částic (0,2 až 20 mm/s) a 22 průměrů vodních částic (0,16 až 8 mm). Zaznamenává srážky s intenzitou 0,005 až 250 mm/hod.

Princip měření

Principem měření srážek pomocí laserového detektoru srážek je měření intenzity světelného paprsku a měření změny intenzity paprsku při průchodu srážek. Přístroj LPM je vybaven vysílačem a přijímačem světelného paprsku. Vysílač paprsku vysílá infračervený paprsek (vlnová délka 785nm). Na straně přijímače vyzařovaného paprsku se nachází fotodioda s objektivem, která změří optickou intenzitu světelného paprsku a transformuje ji na elektrický signál. Částice, které propadají skrz světelný paprsek, přijímaný elektrický signál snižují. Měřicí plocha světelného paprsku je 45.6 cm². Rychlost propadlé částice se určí z doby trvání redukováného signálu. Průměr částice je vypočítán z amplitudy snížení signálu. Princip měření je demonstrován na Obr. 4.



Obr. 4: Princip měření laserovým detektorem srážek. Vyobrazení převzato z manuálu výrobce Thies Clima [10].

Naměřené hodnoty jsou zpracovány signálovým procesorem. Jejich správnost je kontrolována výpočtem porovnávacím zaznamenané veličiny jako intenzita, množství, druh srážek (mrholení, déšť, sníh, kroupy měkké, krupobití, a smíšené srážky atd.) a spektrum částic (průměr a rychlost).

Typ srážky je určen z průměru a rychlostí vodních částic. Některé typy tohoto přístroje zahrnují ke zlepšení identifikace srážek vliv teploty. Srážky s teplotou nad 9°C jsou automaticky brány jako kapalné (výjimkou je měkké krupobití a krupobití), srážky s teplotou nižší než -4°C jsou klasifikovány jako srážky pevné. V rozmezí teplot mezi -4 a 9°C mohou být srážky ve všech formách.

Vypočtené hodnoty jsou ukládány každou minutu a poté přenášeny přes sériové rozhraní. Přístroj je téměř bezúdržbový. Pouze v případě nutnosti je potřeba čistit skleněné hlavice vysílače a přijímače signálu.

Umístění

LPM by neměl být umístěn na tmavou plochu (tmavý kámen nebo asfalt). V takovém případě při silném slunečním záření může stoupající ohřátý vzduch ovlivnit přesnost měření. Jako ideální podklad je doporučen travnatý povrch.

Rychlost vodních částic během srážek propadajících skrze světelný paprsek LPM je závislá na směru a rychlosti větru. Nesprávné umístění přístroje na místě, kde by bylo měření ovlivňováno rychlostí větru, tedy zhoršuje kvalitu a věrohodnost snímaných dat. Z tohoto důvodu by LPM neměl být umístěn uprostřed krajiny (zejména na vrcholku hory) nebo v závětrí překážky. Podle směrnice Mezinárodní meteorologické organizace by vzdálenost mezi překážkou a přístrojem, měla být nejméně čtyřikrát větší než výška této překážky. Není také vhodné přístroj instalovat přímo na ulici. Doporučuje se přístroj umístit do veřejnosti uzavřeného prostoru kvůli bezpečnosti, přestože intenzita laserového paprsku je považována za bezpečnou pro lidské oko.

2.2.2 Překlopné srážkoměry, Fiedler

Srážkoměr SR03 firmy Fiedler je překlopný člunkový srážkoměr se zachytnou plochou 500 cm² (Obr. 5). Je určený pro měření tekutých i tuhých srážek. Principem měření je mechanismus „děleného překlápěcího člunku“ [4]. Člunek je umístěn pod výtokem nálevky. Z nálevky vytéká do horní poloviny člunku déšť či roztátý sníh. Dojde-li k jeho naplnění 5 ml srážek, člunek se překlopí. Každé překlopení je zaznamenáno pulsem, který představuje 0.1 mm srážek. Překlopením člunku zároveň vyteče voda z nyní spodní poloviny děleného člunku. Po celou dobu trvání deště se člunek střídavě plní a překlápí. Každé překlopení je pulsem, který je zaznamenán v připojeném registračním zařízení. Registrační zařízení může počítat z počtu pulsů a z prodlevy mezi nimi jednak celkové množství srážek, ale také intenzitu srážky.



Obr. 5: Překlopný srážkoměr SR03 Fiedler se zachytnou plochou 500 cm². Vyobrazení převzato z manuálu Fiedler [4].

Srážkoměr je odolný vůči povětrnostním vlivům. Válcový plášť, nálevka a kruh v horní části jsou vyrobeny z hliníkové slitiny. Uvnitř těla srážkoměru je v plastové základně umístěn mechanismus překlápěcího člunku. K dispozici je také libela, která slouží ke kontrole vodorovného umístění a tři šrouby, kterými je možno vodorovnou polohu zajistit. Dále aretační šrouby pro kalibraci srážkoměru a otvory pro vytékání vody.

Srážkoměr, respektive jeho horní hrana, by měl být umístěna 1 m nad terénem. Výrobce doporučuje k umístění použít nerezový stojan S301 a betonovou základovou dlaždici.

Pro celoroční použití srážkoměru a nepřetržité měření tekutých i tuhých srážek je nutné použít vytápěnou variantu srážkoměru SR03/V. V případě této varianty je vytápěn odděleně plášť srážkoměru a vnitřní prostor, aby nedošlo k namrzání odtokových otvorů. Uvnitř těla srážkoměru je také umístěn regulátor, který zajišťuje postupné odtávání sněhu bez jeho vypařování.

Výrobce udává tři hodnoty přesnosti měření zachycených srážek při různých intenzitách srážky. Při srážce s intenzitou do 30 mm/hod je přesnost měření $\pm 5\%$. Při srážce s intenzitou do 100 mm/hod $\pm 10\%$ a při srážkách s intenzitou do 200 mm/hod $\pm 15\%$.

Srážkoměr váží 4,3 kg a jeho pracovní teplota je 0°C až $+60^{\circ}\text{C}$ [4].

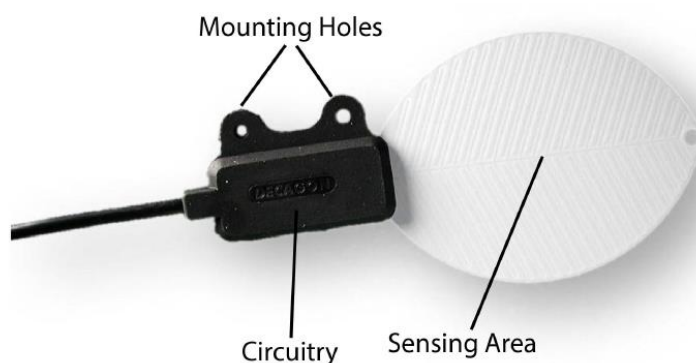
2.2.3 Leaf Wettness Sensors, Decagon Devices Inc.

Leaf Wettness Sensors (dále LWS, Decagon Devices Inc.), Obr. 6, jsou přístroje určené k měření padajících srážek nebo kondenzované vlhkosti usazené na listech, nebo obecně na respiračních orgánech rostlin. Informace o tomto typu senzoru jsou převzaty z manuálu, který je poskytován výrobcem Decagon Devices Inc. [9].

Princip měření

Principem měření tohoto čidla je měření dielektrické konstanty tenké laminátové destičky. Běžné přístroje měřící vlhkost ji zaznamenávají tak, že přemostí vodu na povrchu senzoru elektrickými cestami. LWS senzory pouze měří dielektrickou konstantu v zóně asi 1 cm nad horním povrchem senzoru. Voda v kapalném stavu má dielektrickou konstantu cca 80, led přibližně 5 a tyto hodnoty jsou výrazně vyšší a tudíž dobře odlišitelné od dielektrické konstanty vzduchu, která je 1. To znamená, že tímto způsobem lze velmi dobře určit, kdy je na povrchu vlhkost a kdy nikoli. Senzor rozpoznává na svém povrchu i velmi malé částičky vody či ledu.

Rozměry čidla jsou 11,2 cm x 5,8 cm x 0,75 cm. Primárně je určeno k instalaci do korun stromů, nebo na stožáry meteorologických stanic.



Obr. 6: LWS senzor. Vyobrazení převzato z manuálu Decagon Devices Inc. [9].

Výhody

Přístroj je speciálně vyrobený tak, že velmi dobře napodobuje zdravé živé listy. Tento laminátový senzor LWS se svými termodynamickými vlastnostmi, jako je specifické teplo, tepelná kapacita a také hustota a tloušťka, je velmi podobný listům a jejich vlastnostem za mokrého stavu.

Výhodou je také nízká energetická náročnost čidla. Senzor má nízký příkon, což dává uživateli možnost provádět měření po dlouhou dobu na odlehlých místech z bateriových zdrojů.

Další důležitá výhoda je nezávislost měření na okolní teplotě.

Interpretace dat

Většina aplikací tohoto senzoru spočívá ve zjišťování, zda je na povrchu voda či nikoli bez možnosti zjistit její množství. K tomu je třeba identifikovat odpovídající prahovou hodnotu čidla za mokrého stavu.

Suchému stavu odpovídají hodnoty 445 a při absolutně vlhkém stavu, při silném dešti, vystoupají hodnoty až na 1400. Výrobce udává dvě kritické hodnoty pro určení srážky a to hodnoty 450 a 460 v závislosti na stupni kontaminace senzoru aerosoly. Prahové hodnoty pro detekci kondenzátu na čidle jsou úměrné budicímu napětí, mohou se tedy v případě jeho rozdílné úrovně lišit.

2.2.4 TMS stanice

Stanice TMS jsou určeny primárně k měření vlhkosti a teploty půdy. V této práci bude stanice zkoumána jako detektor srážek umístěný na vzduchu.

Popis stanice

Stanice TMS, viz Obr. 7, má dvě části, nadzemní a podzemní. V podzemní části je čidlo vlhkosti, řídicí jednotka a teploměr. Nadzemní část obsahuje přízemní teploměr, teploměr vzdušný a hlavně zdroj, tedy baterii.

Princip měření čidla vlhkosti stanice je založen na metodě TDT, time domain transmission, tedy transformace pulsu v čase probíhajícího na rozhraní čidla a půdního prostředí. Stanice je vyrobena tak, aby měla podobné vlastnosti jako půda.

Konstrukce spočívá ve využití technologie výrob vícevrstvé desky plošných spojů, kdy na základní desce je vyleptaný motiv zpoždovací linky, který je pokryt ochrannou vrstvou. Tato vrstva je deklarovaná jako rovná, souvislá a nenasákavá. Materiál je sklolaminát, proto je pevný a nelze jej běžným zacházením poškodit. Přesně definuje dielektrikum rozhraní s půdou [19]. Stanice disponuje integrovanou záznamovou jednotkou.



Obr. 7 TMS stanice. Vyobrazení převzato z webových stránek výrobce TOMST s. r. o. [20].

Tento přístroj byl vybrán pro porovnávání vlhkosti v této práci mimo jiné proto, že se na jeho vývoji podílel doc. Martin Šanda a další pracovníci z Českého vysokého učení technického v Praze.

V porovnání s ostatními výše zmíněnými přístroji je tento výrazně levnější. Cena jedné stanice se pohybuje kolem 2 000 Kč.

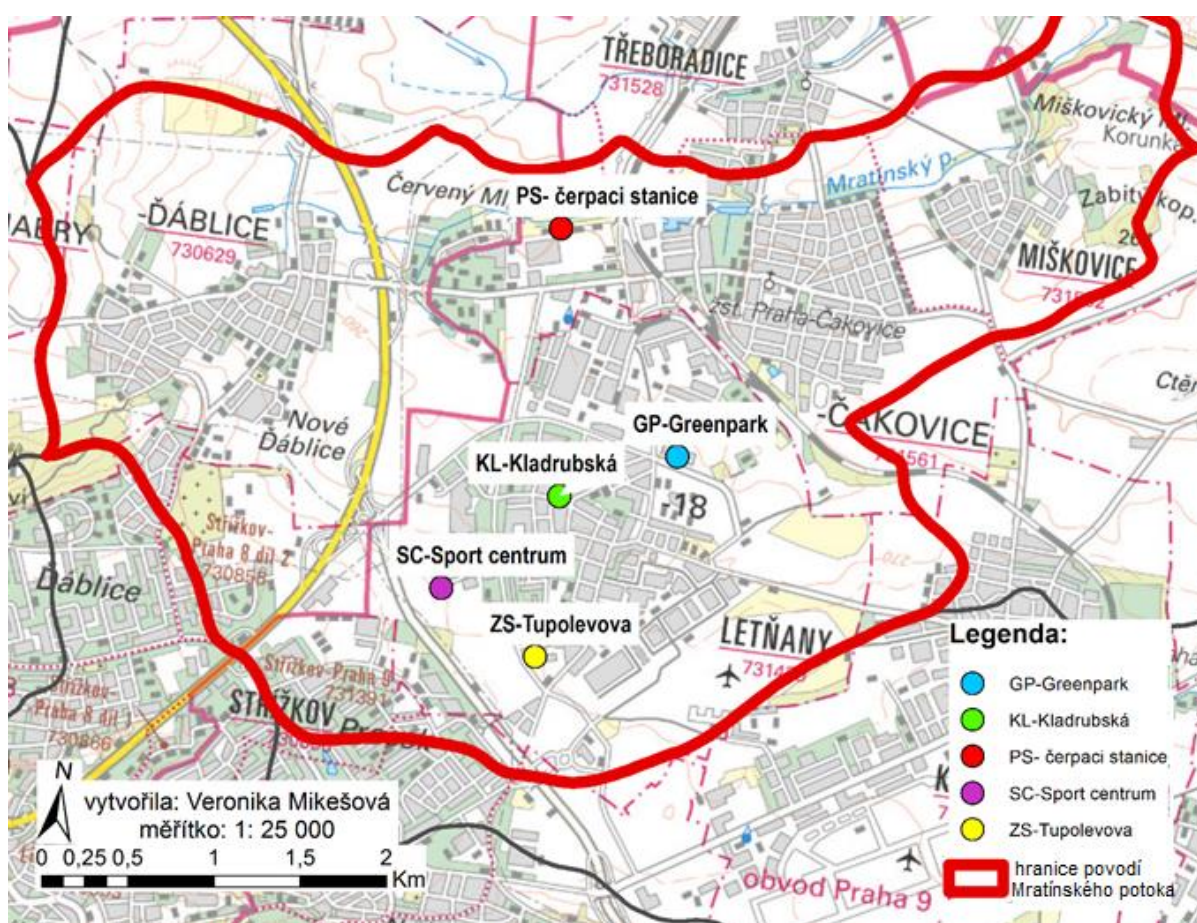
3 Popis povodí a datových souborů

3.1 Experimentální povodí Letňany

Pro zkoumání a instalaci všech výše uvedených přístrojů bylo vybráno povodí Mratínského potoka v Letňanech, viz Obr. 8. Hranice povodí byla převzata z digitální báze vodohospodářských dat (DIBAVOD) [6], kterou poskytuje Výzkumný ústav vodohospodářský T. G. Masaryka [7].

Jedná o venkovský mikroregion nacházející se severně až severovýchodně od centra Prahy na území okresu Praha-východ. Členskými obcemi jsou Bašť, Bořanovice, Čakovičky, Kojetice, Kostelec nad Labem, Líbeznice, Měšice, Mratín, Nová Ves, Sedlec, Sluhy, Veleň, Zdiby, Zlonín.

Rozloha povodí činí 80,711 km². Povodí je poměrně hustě osídleno. Průměrně na jednom kilometru čtverečním bydlí 130 obyvatel, což je o 29 obyvatel více, než je průměr ve Středočeském kraji.



Obr. 8: Povodí Mratínského potoka. Mapový podklad: základní mapa ČR ČÚZK poskytovaná ArcGis online [8].

3.1.1 Data z překlopných srážkoměrů

K dispozici byla data ze sedmi srážkoměrů na pěti místech, takže ze dvou míst jsou data zdvojená. Data zahrnují intenzitu srážky v minutovém kroku. Seznam srážkoměrů s popisem umístění je uveden v Tab. 1.

Tab. 1: Přehled umístění srážkoměrů

Srážkoměr	Umístění
RG1	v úrovni terénu, u pozemní čerpací stanice podniku PVK a.s. v Letňanech (PVK a.s.)
RG2	na střeše Sport Centra (PVK a.s.)
RG3	na střeše průmyslové haly Greenpark (logistické centrum ve Veselské ulici (PVK a.s.)
RG4	na střeše jídelny základní školy Tupolevova (ČVUT)
RG5	na střeše Sport Centra (ČVUT)
RG6	na střeše průmyslové haly Green park (logistické centrum ve Veselské ulici), (ČVUT)
RG7	na střeše panelového domu v ulici Kladrubská, (ČVUT)

V závorce je vždy uveden provozovatel srážkoměru na určitém místě.

Zdvojená data jsou ze Sport Centra (RG2 a RG5) a z Green parku (RG3 a RG6).

Všechna srážkoměrná stanoviště jsou znázorněna na mapě povodí Mratínského potoka, Obr. 8. Délka časových řad jednotlivých překlopných srážkoměrů je uvedena v Tab. 2.

Tab. 2: Časové řady překlopných srážkoměrů

srážkoměr	2014	2015
RG1 Pozemní stanice (PS)	1. duben - 31. prosinec	1. duben - 30. září
RG2 Sport Centrum (SC)	1. duben - 31. prosinec	1. duben - 30. září
RG3 Green park (GP)	1. duben - 31. prosinec	1. duben - 30. září
RG4 Základní škola (ZS)	1. červenec - 30. listopad	1. duben - 30. září
RG5 Sport Centrum (SC)	1. červenec - 30. listopad	1. duben - 30. září
RG6 Green park (GP)	1. červenec - 30. listopad	1. duben - 30. září
RG7 Kladrubská (KL)	-	1. květen - 30. září

Podstatnou informací je také to, že všechna data z překlopných srážkoměrů jsou ve Středoevropském čase.

3.2.2.1. Časové řady vypočtených výparů

Po filtraci dní s dostatkem hodnot byla získána řada výparů Tab. 3.

Tab. 3: Časová řada vypočtených výparů

stanice	období	Juliánský den
Sport Centrum	14. duben - 20. duben 2015	104-110
	4. květen - 19. červen 2015	124-170
	13. červenec - 17. září 2015	194-260
Základní škola	14. duben - 30. září 2015	104-270
	Green park	17. září - 27. listopad 2014
Green park	13. duben - 26. srpen 2015	103-236
	7. září - 18. září 2015	248-258
	20. září 2015	260
Kladrubská	18. duben - 30. září 2015	108-270

3.2 Datový soubor

V této kapitole jsou uvedeny a popsány datové řady z jednotlivých přístrojů tak, aby bylo možné na tuto práci případně navázat, a bylo zřejmé, z jakých dat byly všechny analýzy

v následujících kapitolách provedeny. Srážkoměrných stanovišť, tj. míst, kde byly přístroje umístěny, je v povodí pět, Obr. 8.

3.2.1 Uzlový bod povodí

Uzlovým bodem povodí je panelový dům v ulici Kladrubská. Je zhruba uprostřed celého povodí a bylo zde umístěno několik různých přístrojů. Jednak je zde jeden už výše uvedený překlopný srážkoměr s číslem 7, RG7_KL a dále potom laser precipitation monitor (LPM), jeden LWS senzor a tři senzory TMS.

3.2.2.2. Laserový detektor srážek

Z laserového detektoru LPM, který je z přístrojů zde uvedených nejpřesnější, byla k analýze k dispozici nejkratší časová řada, navíc s výpadky. Po filtraci zbyla časová řada, jejíž rozsahy jsou v Tab. 4. Data z LPM jsou registrována ve Středoevropském čase.

Tab. 4: Časové řady dat laserového detektoru srážek, rok 2015.

Data laserového detektoru
1. leden 0:00 -13. březen 8:32
13. březen 9:04 - 19. březen 15:09
19. březen 15:11 - 3. duben 7:39
3. duben 8:00 - 24. duben 9:30
22. květen 8:51 - 10. červen 6:59
10. červen 8:00 - 26. červen 7:47
26. červen 8:00-20. červenec 5:59
20. červenec 7:00-17. srpen 7:35

3.2.2.3. LWS

Ze senzorů LWS byla k dispozici nekontinuální řada dat v různých časech. Pro identifikaci časů jednotlivých řad byla použita data z překlopných srážkoměrů. Na základě porovnání s těmito daty mohly být časy epizod určeny (Tab. 5).

Tab. 5: Datové řady LWS senzoru

Začátek epizody	Konec epizody	Čas
24.4.2015 6:11	15.5.2015 14:32	SEČ
15.5.2015 14:36	22.5.2015 7:39	SEČ
22.5.2015 7:46	10.6.2015 7:49	SEČ
10.6.2015 7:53	26.6.2015 8:50	SELČ
26.6.2015 8:51	20.7.2015 8:23	SELČ
22.7.2015 18:19	17.8.2015 8:50	SELČ
6.9.2015 16:43	2.10.2015 8:15	SELČ
10.10.2015 19:18	5.11.2015 8:50	SEČ

3.2.2.4. TMS

Senzory TMS byly v uzlovém bodě, na střeše panelového domu v Kladrubské, umístěny celkem 3, s pořadovými čísly 332, 335 a 336. Všechna tři čidla byla instalována na uzlový bod povodí 25. dubna 2015 a odinstalována byla 2. října 2015. Další velmi důležitou informací je, že měření čidly TMS jsou registrována v koordinovaném světovém čase (UTC).

4 Analýza dat

4.1 Výpočet teploty rosného bodu

Senzory vlhkosti LWS a TMS zaznamenávají každé zvýšení vlhkosti, a proto je teplota rosného bodu potřebná pro odlišení malých srážek a zvýšené vlhkosti vzduchu z důvodu ranních ros. Rosný bod je teplota, při níž se vzduch následkem izobarického ochlazování stane nasyceným, aniž by mu byla dodána vodní pára zvnějšku [18]. Současně je to teplota, při níž je vzduch maximálně nasycen vodními parami. Relativní vlhkost vzduchu je 100 %. Pokud je teplota aktuální nižší než teplota rosného bodu, nastává kondenzace, rosa. Rosný bod je závislý na absolutní vlhkosti vzduchu, čím více je ve vzduchu vodních par, tím je teplota rosného bodu vyšší. To znamená, že zkondenzuje již při vyšší teplotě než v případě vzduchu s malým podílem vodních par.

4.1.1 Postup výpočtu rosného bodu

Nasycený tlak vodní páry při teplotě T byl vypočten z Clausiovy-Clapeyronovy rovnice pro fázový přechod [11].

$$p_{vs}(T) = p_{vs}(T_0)e^{\left(\frac{\Delta H_{vap}}{R}\left(\frac{1}{T_0} - \frac{1}{T}\right)\right)} \quad (1)$$

kde $\Delta H_{vap} = 44,8 \text{ kJ/mol}$ je výparná entalpie, R je univerzální plynová konstanta $R = 8,314 \text{ J/mol K}$, T je aktuální teplota vzduchu, T_0 je referenční teplota vzduchu.

K výpočtu byly k dispozici pětiminutové teploty a vlhkosti ze srážkoměrů RG4 (ZS) a RG7 (KL).

Z tlaku nasycené vodní páry lze při znalosti relativní vlhkosti vzduchu získat aktuální tlak vodní páry:

$$p_v(T) = p_{vs}(T)RH \quad (2)$$

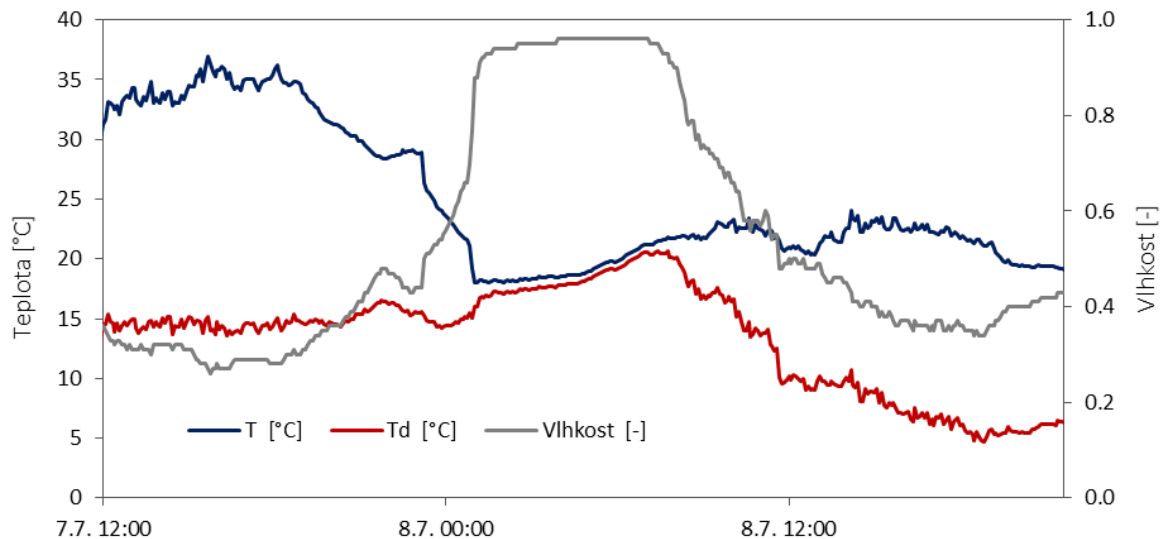
kde RH je aktuální relativní vlhkost vzduchu.

Při znalosti aktuálního tlaku vodní páry, lze z rovnice (1) vyjádřit teplotu rosného bodu

$$T_d = \frac{1}{\frac{-R}{\Delta H_{vap}} \ln(RH) + \frac{1}{T_0}} \quad (3)$$

4.1.2 Analýza vypočtených teplot rosného bodu

Výstupem jsou pětiminutová data teplot rosných bodů. Zde je uveden pouze vybraný úsek, kde je vykreslena naměřená vlhkost, naměřená aktuální teplota a vypočtená teplota rosného bodu, viz Obr. 9. Obrázek dobře dokládá skutečnost, že malý rozdíl aktuální teploty vzduchu a teploty rosného bodu je asociovaný s vysokou vlhkostí a obráceně.



Obr. 9: Teplota rosného bodu v uzlovém bodě v Kladrubské ulici, Praha Letňany, rok 2015.

4.2 Odhad potenciální evapotranspirace

Bohužel nebyla na povodí k dispozici měření slunečního záření, potažmo čisté radiace tudíž nelze využít standardních výpočetních postupů výpočtu výparu z mikrometeorologických měření, jako jsou například Penman nebo Penman-Monteith [12] [13]. Proto byla zvolena metoda odhadu potenciálního výparu podle Hargreaves [14]. Tento odhad vyžaduje následující znalosti.

4.2.1 Výpočet

Sluneční záření nebylo na zkoumaných lokalitách měřeno, proto bylo využito metody výpočtu extraterestriální radiace, tj. insolace na horním okraji atmosféry. Metoda výpočtu byla převzata z [17]. Inverzní relativní vzdálenost Země a Slunce d_r a solární deklinace δ jsou dány vztahy:

$$d_r = 1 + 0,033 \cos\left(\frac{2\pi}{365}J\right) \quad (4)$$

$$\delta = 0,409 \sin\left(\frac{2\pi}{365}J - 1,39\right) \quad (5)$$

kde J je číslo dne v roce od 1 (1. leden) do 365 (31. prosinec) nebo 366, pro přestupný rok.

Úhel západu Slunce ω_s je dán:

$$\omega_s = \frac{\pi}{2} - \arccos \frac{[-\tan(\varphi) \tan(\delta)]}{X^{0,5}} \quad (6)$$

kde φ je zeměpisná šířka [rad], kde X :

$$X = 1 - [\tan \varphi]^2 [\tan \delta]^2 \quad (7)$$

Když $X \leq 0$ tak $X = 0,00001$

Extraterestriální radiace R_a se vypočítá

$$R_a = \frac{24 (60)}{\pi} G_{sc} d_r [\omega_s \sin \varphi \sin \delta + \cos \varphi \cos \delta \sin \omega_s] \quad (8)$$

kde G_{sc} je solární konstanta je rovna $0.0820 \text{ MJ m}^{-2} \text{ min}^{-1}$

Extraterestriální radiaci je nutné obvykle upravovat na radiaci za předpokladu bezoblačného dne, a dále se používají redukce na oblačnost. V této práci byl použit Hargreavesův výraz, který pracuje rovnou s extraterestriální radiací a redukcí provádí přímo pomocí integrálního empirického koeficientu, který je roven 0,408, viz rovnice (9).

$$\text{Intenzita výparu [mm day}^{-1}] = 0,408 * \text{Radiace [MJ m}^{-2} \text{ day}^{-1}] \quad (10)$$

$$ET_0 = 0,0023(T_{mean} + 17,8)(T_{max} - T_{min})^{0.5} R_a \quad (11)$$

Pro výpočet byly potřeba určit souřadnice jednotlivých bodů povodí, kde jsou umístěny srážkoměry. To bylo určeno pomocí mapového serveru mapy.cz [15], viz Tab. 6.

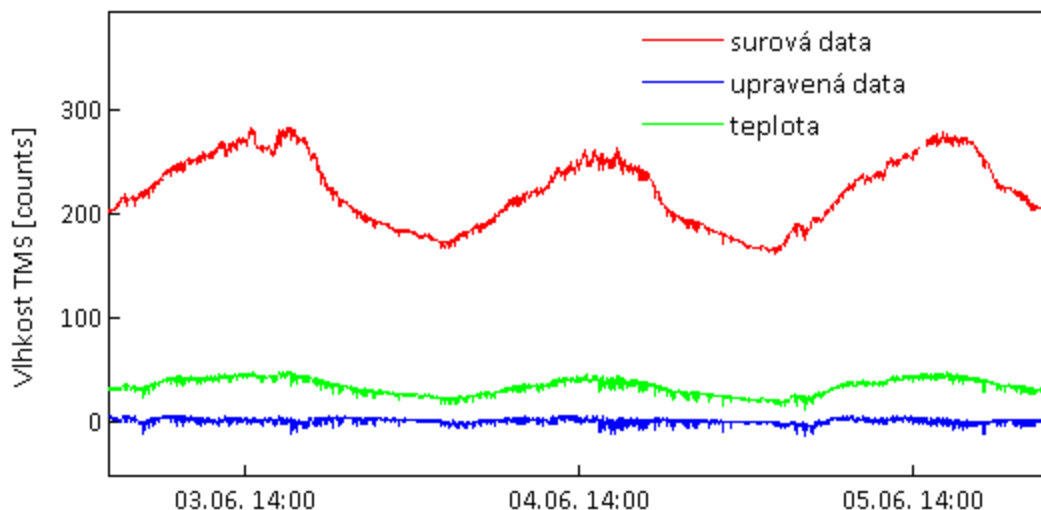
Tab. 6: Souřadnice lokalit v zájmovém povodí Letňany.

stanice	Souřadnice [°]	
Sport Centrum	50,1332314	severní šířka
	14,5010119	východní délka
Základní škola	50,13046	severní šířka
	14,50947	východní délka
Green park	50,1417858	severní šířka
	14,5189614	východní délka
Kladrubská	50,13889	severní šířka
	14,50982	východní délka
Praha Kbely	50,1317189	severní šířka
	14,5516808	východní délka

4.3 Zpracování dat ze senzorů TMS

Následující zpracování dat ze senzorů TMS bylo provedeno v programu Matlab [16].

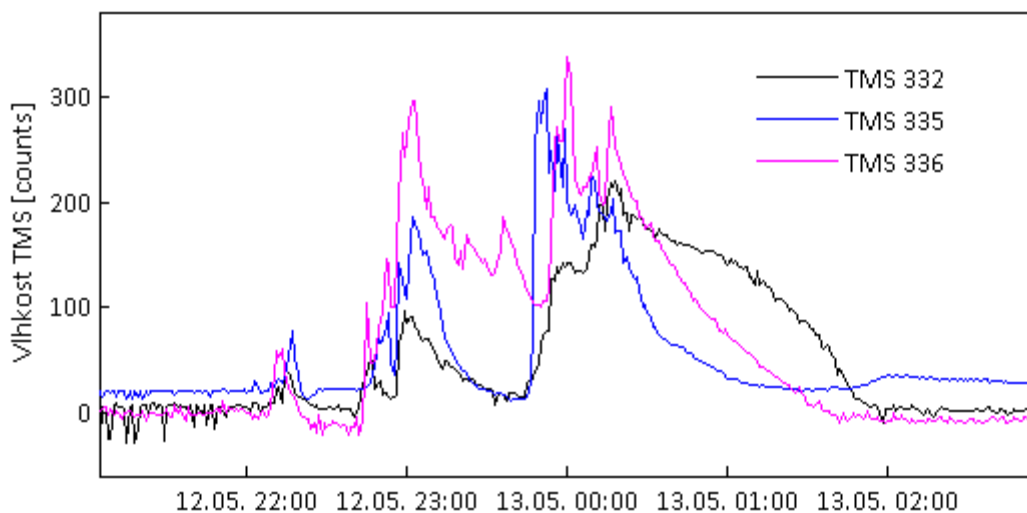
U senzorů vlhkosti TMS není možné nastavit žádnou základní hodnotu, která by při použití čidla na vzduchu udávala hodnotu, při níž lze říci, že nepršelo. Jak již bylo zmíněno, surové hodnoty, které jsou výsledkem měření, jsou silně závislé na teplotě (Obr. 10). Proto byla pro analýzu a jejich další zpracovávání použita již očištěná data. Vlhkosti byly upraveny podle teplotního základu získaného metodou lineární regrese v jednodenním kroku. Tím byla data teplotní závislosti částečně zbavena, ale pouze v lokálním měřítku. Pokud je pohlíženo na srážky z různých dnů, nastává problém se základní hodnotou. Každá srážka má základní hodnotu odlišnou.



Obr. 10: Surová data (závislá na teplotě) a data upravená (očištěná od vlivu teploty) z přístroje TMS335, rok 2015. Čidlo bylo umístěno na střeše panelového domu v Kladrubské ulici v uzlovém bodě povodí.

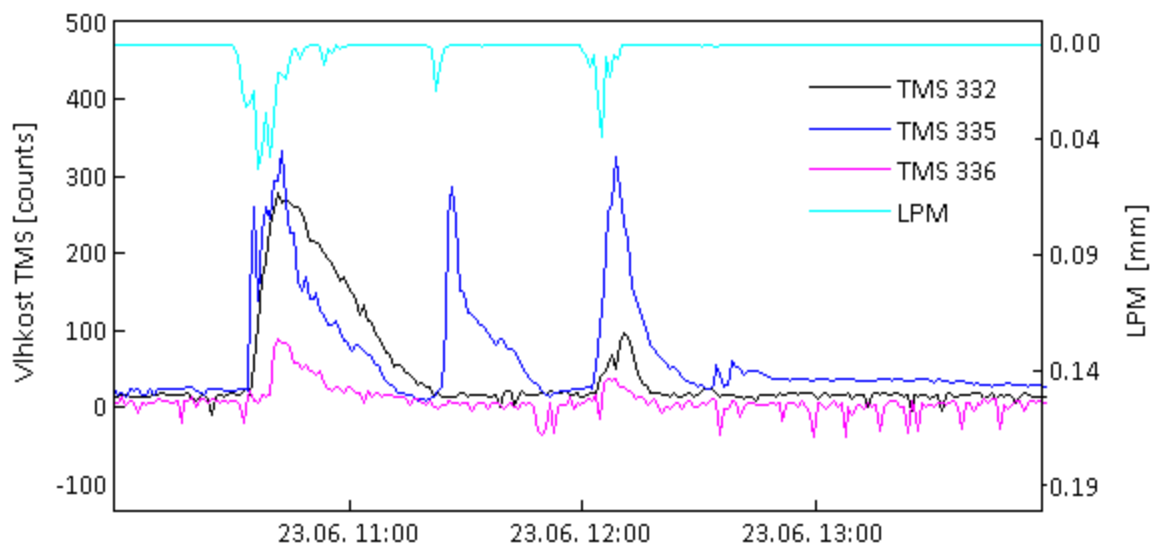
4.3.1 Srovnání senzorů TMS

Data jsou k dispozici ze tří senzorů s výrobními čísly 332, 335 a 336. Prvním dílčím úkolem při zpracování dat bylo porovnat čidla mezi sebou a určit případně jedno pro další zkoumání. Po vykreslení dat, bylo zřejmých několik skutečností. Čidlo s číslem 332 má klidovou hodnotu během zkoumaného období přibližně mezi 380 a 420, zatímco ostatní dva přístroje kolem nuly. Proto byla pro porovnávání vykreslena hodnota o 400 menší u TMS332. Čidlo 332 má také ve většině případů pomalejší osychání po srážkové události a velké rozkmity kolem základní linie. Zmíněné je ilustrováno na Obr. 11.



Obr. 11: Porovnání vlhkostí z čidel TMS 332, 335 a 336. Data z roku 2015. Čidla byla umístěna na střeše panelového domu v Kladrubské ulici v uzlovém bodě povodí. Data částečně očištěná od vlivu teploty.

V několika případech má velké rozkmity také TMS336. Celkově udává TMS 336 při zvýšení vlhkosti daleko menší hodnoty než ostatní dvě čidla (Obr. 12). Na Obr. 12 jsou zobrazena data ze všech třech senzorů TMS společně se srážkovou intenzitou měřenou laserovým detektorem srážek LPM. Srážka z LPM je zde vykreslena pro lepší orientaci, kdy skutečně pršelo a jak na to TMS senzory reagovaly. Nejlépe reaguje čidlo TMS 335, které v tomto případě zobrazuje 3 srážkové vlny stejně jako LPM. TMS 332 a 336 často srážky vůbec nezaznamenají, nebo reagují jen velmi málo, takže ze samostatných dat daného přístroje lze jen těžko určit, zda se skutečně jednalo o srážkovou událost.



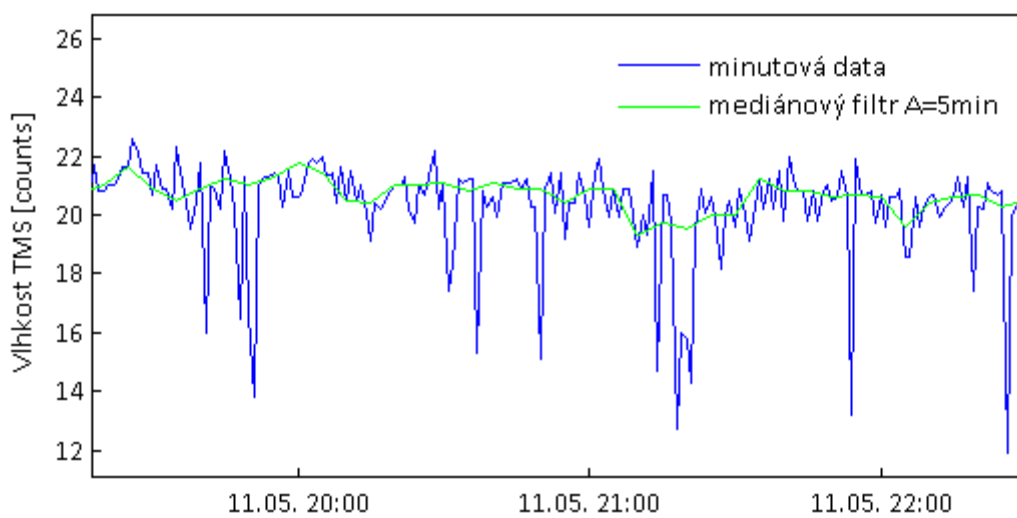
Obr. 12: Srovnání vlhkostí čidel TMS se srážkou z laserového detektoru LPM, rok 2015. Čidla i laserový detektor LPM byla umístěna na střeše panelového domu v Kladrubské ulici v uzlovém bodě povodí. Data TMS částečně očištěná od vlivu teploty.

Nejllepšími daty z hlediska reakce na srážku z LPM disponuje jednoznačně čidlo TMS 335, jehož data byla podrobena dalšímu zkoumání. Jedná-li se o srážku relativně intenzivní a dlouhotrvající zdají se být přístroje z hlediska zjištění počátku srážky a doby schnutí senzorů rovnocenné.

4.3.2 Identifikace počátků padajících srážek

Senzory TMS byly do povodí instalovány primárně z důvodu zjištění jejich použitelnosti jako levné a jednoduché detektory srážek. Dalším úkolem práce bylo určení počátků a konců srážkových událostí.

Jelikož data vykazují velké oscilace kolem základní hodnoty, bylo použito pro vyhlazení dat tzv. mediánového filtru, který využívá vypočtený medián hodnot z předchozích A minut, kde A je volitelný parametr. Tím byly odstraněny osamocené lokální extrémny a docíleno celkového vyhlazení (Obr. 13), kde byl parametr A nastaven na hodnotu 5, odpovídá tedy pěti minutovému kroku.



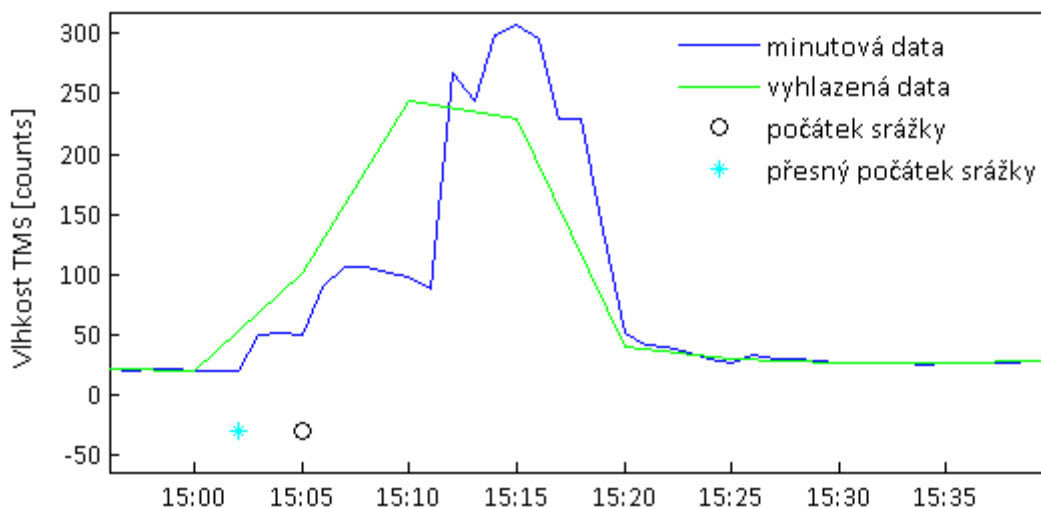
Obr. 13: Ukázka vyhlazení dat z čidla TMS 335 pomocí mediánového filtru s $A = 5$ min. Rok 2015. Minutová data jsou částečně zbavena teplotní závislosti, data vyhlazená mediánovým filtrem jsou vypočtena z minutových.

Využití mediánu se zdá být výhodnější například v porovnání s aritmetickým průměrem, protože aritmetický průměr je ovlivněn jednou výrazně odlehlou hodnotou, zatímco mediánový filtr ojedinělou hodnotu vyfiltruje a ponechá platnou původní střední hodnotu.

K určení počátků srážek byly nejdříve vypočteny derivace vyhlazených hodnot. Z vypočtených derivací byly nalezeny ty, které mají větší hodnotu, než je hodnota kritická (volitelný parametr B) a zároveň průměr z hodnot předchozí hodiny je menší než tato kritická hodnota. Parametr B byl odhadnut na 15. Tímto způsobem se podařilo zjistit všechna místa, kdy derivace mediánových hodnot prudce vzrostla, a u kterých se předpokládá, že jsou asociována s výskytem srážky.

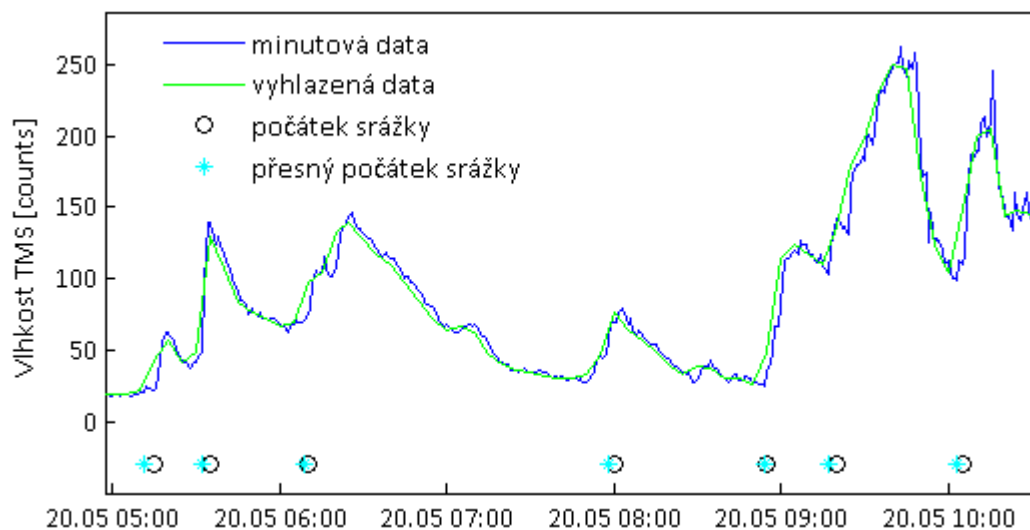
Protože jsou k dispozici data minutová, bylo provedeno ještě zpřesnění takto nalezených počátků dešťů. Nejprve bylo prohledáno C předchozích hodnot minutových derivací a z nich bylo vypočteno maximum. Tímto způsobem byl nalezen největší skok v minutových datech, který odpovídá začátku srážky.

Obr. 14 demonstruje dobrou funkčnost metody na malé srážce o velikosti 1,1 mm a době trvání 20 min.



Obr. 14: Vyhledaný počátek srážky z mediánovým filtrem vyhlazených dat (černé kolečko) a posléze z minutových (světle modrá hvězdička). Parametr $C=2A=10$ minut. Srážka ze dne 9. května 2015 o velikosti 1,1mm (dle srážkoměru RG7, který byl umístěn na stejném místě, v uzlovém bodě povodí). Použita jsou data z čidla TMS 335.

Během delší srážkové epizody může opakovaně přestat pršet, čidlo poté osychá, a následně zase pršet začíná. Tento filtr však vyhledává všechny výrazné změny hodnot, takže nalezne také tyto „vedlejší“ začátky (Obr. 15). To by nebylo možné, pokud by se pouze stanovila pevná základní linie, která by udávala začátek a konec deště.



Obr. 15: Počátky dešťů během jedné srážkové epizody získané pomocí mediánového filtru. Srážka ze dne 20. května 2015. Požita data z čidla TMS 335.

4.3.3 Identifikace doschnutí čidla

Další údaj, který lze z dat čidel TMS získat, je doschnutí čidla. Jelikož se jedná o vlhkoměry, ještě po konci srážky měří čidla vysoké vlhkosti. V závislosti na intenzitě a době trvání srážky potom za nějakou dobu klesnou jejich hodnoty na původní základní linii. Vzhledem k tomu, že se základní linie kvůli teplotní závislosti čidel během zkoumaného období mění, byla pro identifikaci doschnutí čidel použita kritéria využívající následující informace:

- Minutová data ($hum1$)
- Derivace dat vyhlazených mediánovým filtrem ($dmed$)
- Směrodatné odchylky dat vyhlazených mediánovým filtrem (sd)

Prvním kritériem jsou samotné hodnoty vlhkosti:

$$hum1 < 25 \quad (12)$$

Pokud by byla pouze stanovena základní linie, často by doschnutí bylo identifikováno v časech, kdy ještě čidlo následně reaguje na vlhkost okolního vzduchu, tedy např. stále jeho hodnoty klesají. Pokud by byla zvolena základní linie naopak přísně, několik dní by čidlo nebylo identifikováno jako suché ačkoli dle ostatních přístrojů bylo bezdeštné období. Z tohoto důvodu byly do kritérií přidány derivace vyhlazených dat ($dmed$), viz rovnice (13) a (14). Derivace udávají změnu oproti předchozímu kroku, jsou-li derivace větší než kritická hodnota, čidlo reaguje na okolní vlhkost, buďto na přicházející srážku (kladné hodnoty derivací), nebo na dosychání (záporné hodnoty).

$$|mean(dmed(F))| < G \quad (13)$$

$$|mean(dmed(F - 1))| < G \quad (14)$$

kde F je počet předchozích hodnot, které musí být menší než kritická hodnota derivace G .

Prohledávaný vektor $F-1$ hodnot je přidán do kritérií proto, aby byla z výběru odstraněna místa, kde derivace prochází nulou a jsou kolem ní symetrická. F a G jsou volitelné parametry, které byly odhadnuty hodnotami $F=3$ a $G=5$

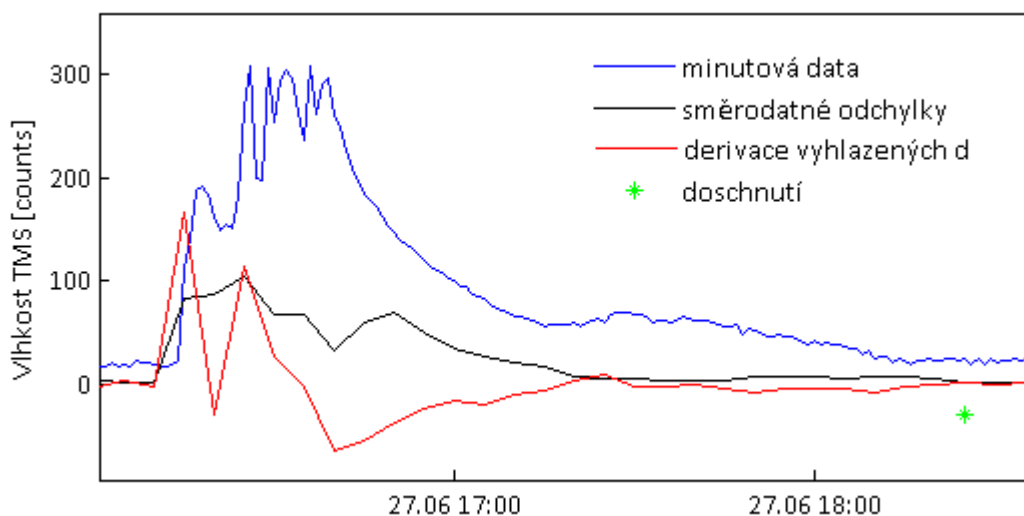
Tato kritéria jsou splněna, když dojde k doschnutí čidla, ale samotná k jeho identifikace nestačí. Důvodem je, že kritérium splňují také časy v nichž má srážka po nějakou dobu téměř shodnou intenzitu. Derivace jsou tudíž blízké nule a nižší než zvolená hodnota parametru G . Z tohoto důvodu bylo přidáno další kritérium využívající směrodatných odchylek mediánovým filtrem vyhlazených dat (sd), které udává variabilitu hodnot kolem průměru.

$$sd < H \quad (15)$$

kde H je volitelný parametr, který je kritickou hodnotou pro směrodatné odchylky vyhlazených dat tj., pro suché čidlo je hodnota směrodatné odchylky menší než H . Parametr H je odhadnut počáteční hodnotou $H = 2$.

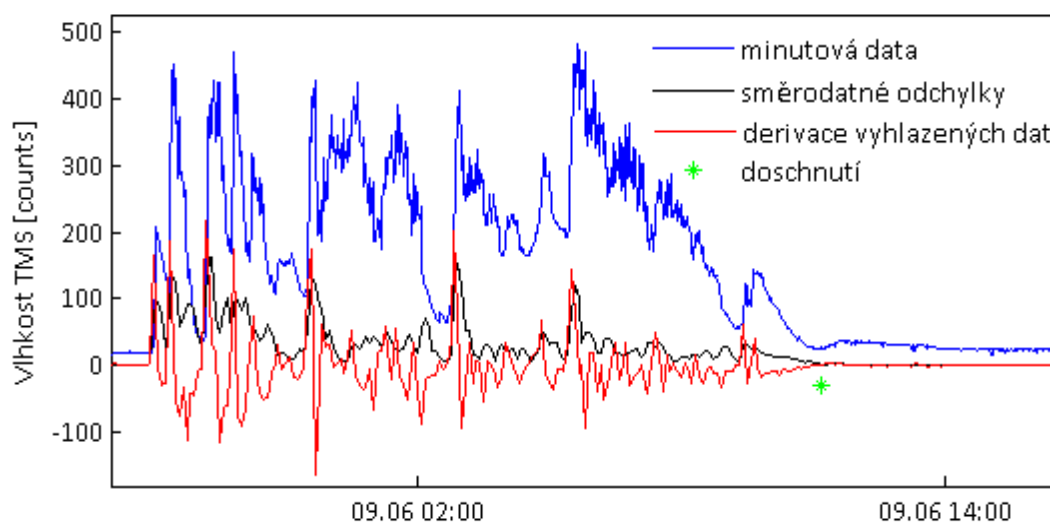
Kombinací výše zmiňovaných čtyř kritérií (rovnice (12), (13), (14) a (15)), bylo docíleno funkčního hledání doschnutí čidel. Příklad fungujícího filtru pro vyhledání doschnutí čidla je

zobrazen na srážce ze dne 27. července 2015 o celkovém úhrnu 1,36 mm a době trvání 22 minut (Obr. 16).



Obr. 16: Identifikace doschnutí čidla TMS. Data z čidla TMS 335. Srážka dne 27. června roku 2015 o celkovém úhrnu 1,36 mm. Použitá kritéria byla derivace vyhlazených dat mediánovým filtrem a směrodatné odchylky vyhlazených dat mediánovým filtrem ($A = 5$ min).

Základní nastavení parametrů pro identifikaci schnutí čidel dobře detekují také srážky velkých úhrnů a dlouhých dob trvání, jak je vidět na Obr. 17, kde je vykreslena srážka ze dne 8. a 9. června roku 2015 o úhrnu 23,13 mm a době trvání 13 hodin.



Obr. 17: Identifikace doschnutí čidla TMS. Data z čidla TMS 335. Srážka ze dne 8. a 9. června roku 2015 o celkovém úhrnu 23,13 mm s dobou trvání 13 hodin. Použitá kritéria byla derivace vyhlazených dat mediánovým filtrem a směrodatné odchylky vyhlazených dat mediánovým filtrem ($A = 5$ min).

4.3.4 Identifikace konců dešťů

TMS čidla detekující vlhkost na svém povrchu, s původním účelem měření půdní vlhkosti. V této práci však byla použita k detekci srážek. Jak již bylo uvedeno výše, začátky srážek identifikují čidla poměrně spolehlivě. Pokud by bylo možné navrhnout nějaký algoritmus, který by určoval konce dešťů, byla by tato levná čidla schopna plně suplovat detektory srážek.

Pro hledání byla zvolena kritéria derivací mediánovým filtrem vyhlazených dat. Prochází-li derivace nulou a mění znaménko z kladné hodnoty na zápornou, znamená to, že čidlo začíná schnout a tedy přestalo pršet.

$$\text{mean}(d\text{med}(P\check{R}ED)) > G \quad (16)$$

$$\text{mean}(d\text{med}(PO)) < G \quad (17)$$

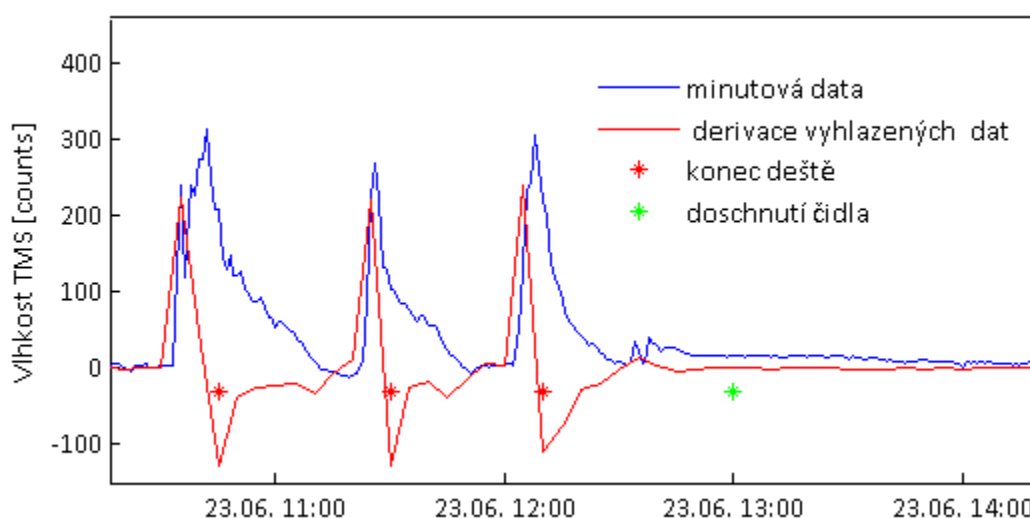
kde $P\check{R}ED$ je vektor F hodnot před daným bodem ($i-F : i$) a PO je vektor F hodnot po daném bodě ($i : i+F$).

G je kritická hodnota derivace a je v tomto případě rovna nule, protože derivace mění znaménko, tím pádem původní hodnoty klesají, tj. čidlo osychá. F je volitelný parametr, který byl nastaven na nulovou hodnotu.

Posledním kritériem je kritérium pro samotné hodnoty mediánovým filtrem vyhlazených dat K .

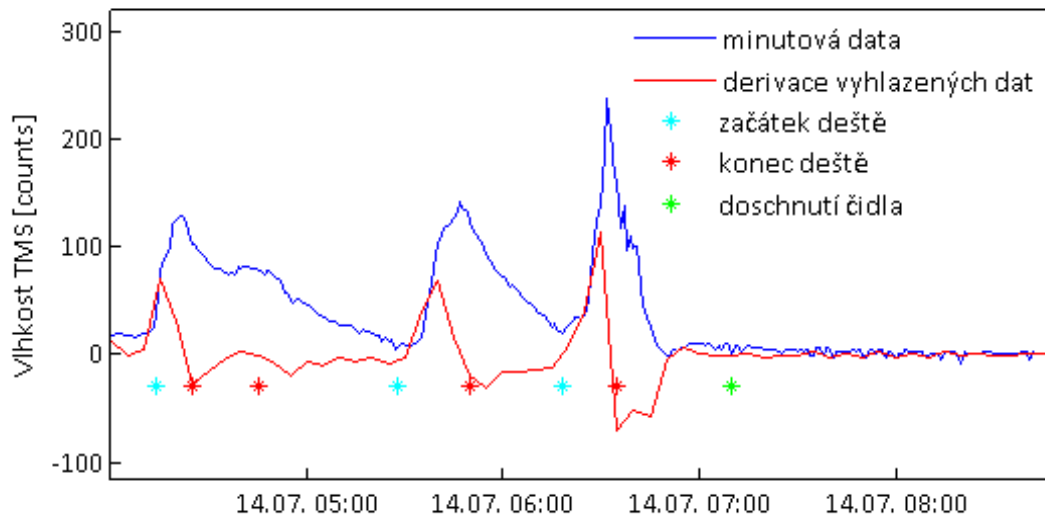
$$\text{med}(P\check{R}ED) < K \quad (18)$$

K je volitelný parametr a byl odhadnut hodnotou 40. Kritérium bylo přidáno, aby byly odstraněny body, kde derivace prochází nulou a čidlo už je suché. Těmito filtry byly nalezeny všechny body během jedné srážky, kde derivace mění znaménko z kladné hodnoty na zápornou (Obr. 18).

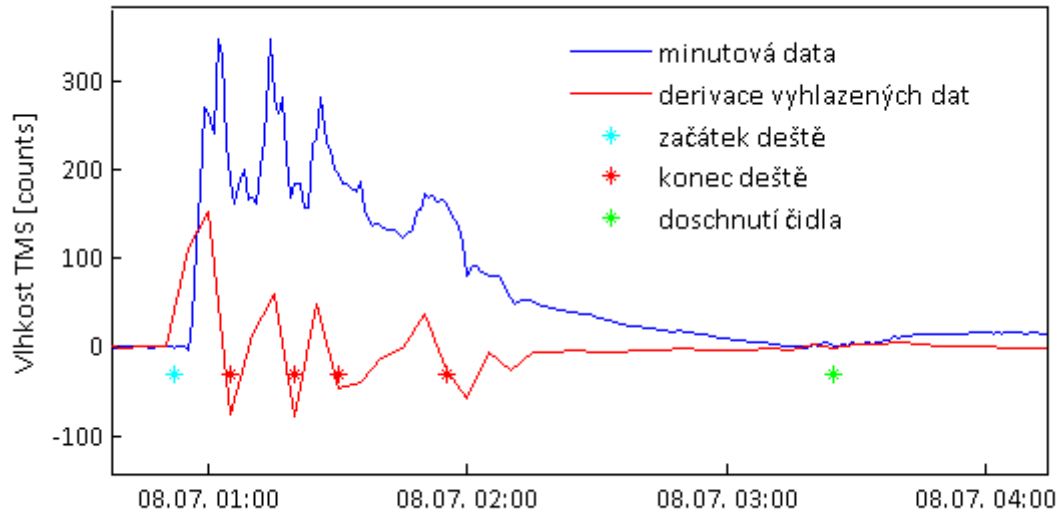


Obr. 18: Identifikace konců dešťů. Data z čidla TMS 335. Srážka ze dne 23. června roku 2015 o celkovém úhrnu 0,53 mm s dobou trvání 2,5 hodiny. Použitá kritéria byla derivace vyhlazených dat mediánovým filtrem ($A = 5$ min).

Na Obr. 19 je doložena dobrá funkčnost všech filtrů, hledání počátku deště, konce deště i doschnutí čidla u srážky o celkovém úhrnu 0,27 mm. Na Obr. 20 je doložena dobrá funkčnost všech filtrů u srážky o celkovém úhrnu 7,1 mm. Během této srážkové epizody několikrát přestalo a filtr to registruje.



Obr. 19: Identifikace počátků, konců dešťů a schnutí čidel TMS. Data z čidla TMS 335. Srážka ze dne 14. července roku 2015 o celkovém úhrnu 0,27 mm s dobou trvání 4 hodiny.



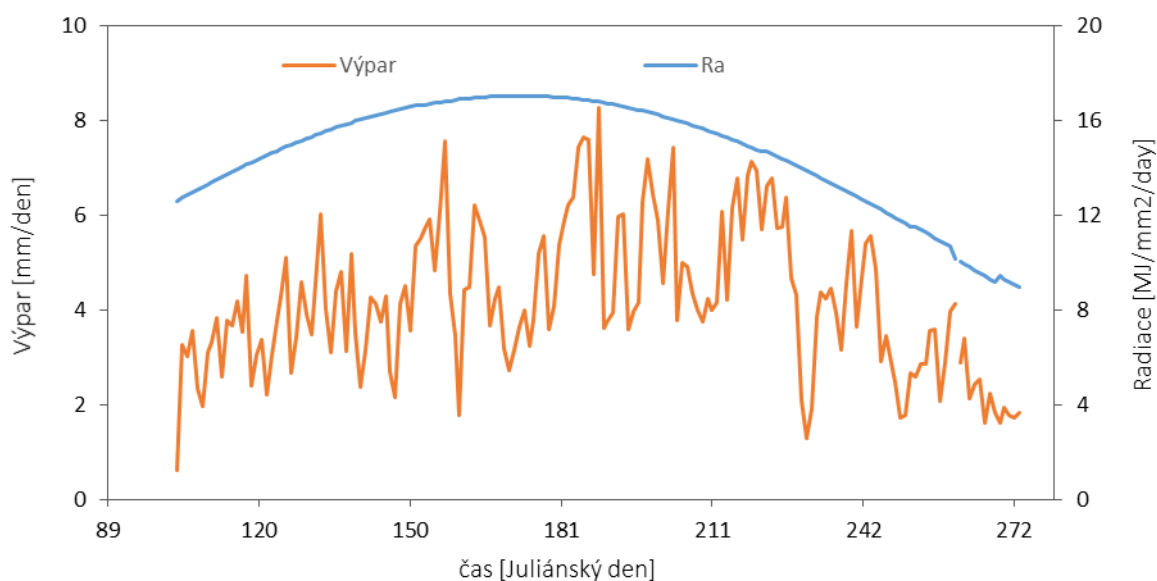
Obr. 20: Identifikace počátků, konců dešťů a schnutí čidel TMS. Data z čidla TMS 335. Srážka dne 8. července roku 2015 o celkovém úhrnu 7,09 mm a dobou trvání 2 hodiny.

5 Výsledky a diskuze

5.1 Extraterestriální radiace a odhad výparu

Výpar a radiace byly vypočteny z pětiminutových teplot ze stanic ČVUT v Praze tedy stanic SC, ZS, GP a KL) roku 2015. Pro rok 2014 byla k dispozici data teplot pouze ze stanice GP z období 17. září až 28. listopadu.

Data z roku 2015 jsou zpočátku neúplná, a protože do výpočtu je potřeba pro každý den teplota minimální, maximální a průměrná, jsou do výpočtu brány v úvahu pouze dny, kdy bylo naměřeno alespoň 144 hodnot, tj. minimálně polovina denních pětiminutových dat. Na Obr. 21 je vykreslen průměrný denní potenciální výpar ze stanic ČVUT v Praze (tedy stanic SC, ZS, GP a KL) z roku 2015 a radiace. Na obrázku je vidět logická závislost výparu na radiaci. Největších hodnot nabývají v červenci a naopak na jaře a na podzim, v dubnu a září už jsou výpary i radiace výrazně nižší.



Obr. 21: Průměrný denní potenciální výpar stanic v povodí Letňany SC, ZS, GP a KL a extraterestriální radiace vypočtená z dat roku 2015.

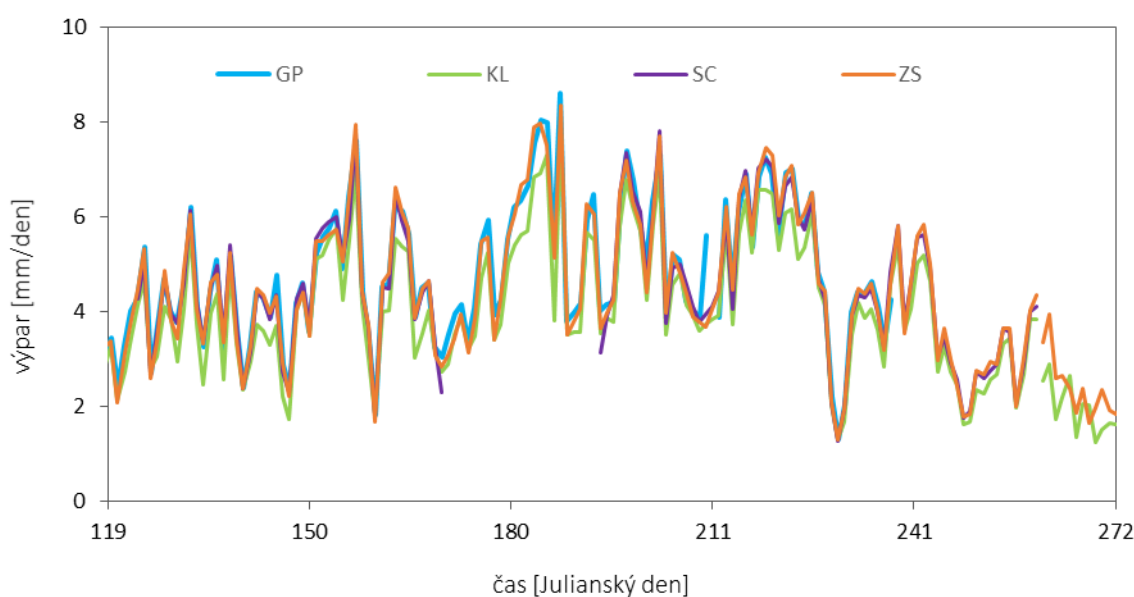
Na Obr. 21 jsou patrné dva propady v odhadnutých výparech ve dnech 9. června (160. Juliánský den) a 18. srpna (230. Juliánský den). Tyto propady byly způsobeny prudkým ochlazením po průchodu studené fronty. V těchto dnech došlo k výraznému poklesu průměrné denní teploty vzduchu (během tří dnů o 17, respektive 7°C), která způsobila snížení odhadnutého potenciálního výparu o 5 mm.

Na Obr. 22 jsou vyneseny všechny vypočtené potenciální denní výpary z jednotlivých stanic GP, KL, SC a ZS. Přístroje na stanici KL byly instalovány na střechu panelového domu ve výšce cca 35 m nad zemí. Přístroje na stanicích ZS a SC byly instalovány ve výšce cca 10 m nad zemí. Přístroje stanice GP byly ve výšce cca 15 m nad zemí. Na stanici KL jsou tyto výpary průměrně nejnižší, přestože bychom spíše intuitivně očekávali opak. Částečně to je způsobeno tím, že v této výšce je průměrně nižší teplota (cca o 0,5°C vůči průměru ostatních stanic Tab. 7). S rostoucí nadmořskou výškou při normálním teplotním zvrstvení teplota vzduchu v troposféře klesá. Průměrný sklon teplotního profilu v troposféře je možné uvažovat hodnotou 0,65°C/100 m. Dalším faktorem, který mohl ovlivnit odhadnuté množství výparu, je rychlost větru. V této výškové úrovni je

rychlost větru výrazně vyšší než u ostatních stanic. Tento parametr však není zahrnut v Hargreavesově vzorci pro odhad potenciálních denních výparů.

Tab. 7: Průměrné, maximální a minimální teploty na stanicích v období od května do září roku 2015

Stanice	Teplota vzduchu		
	průměr [°C]	max. [°C]	min. [°C]
Sport Centrum (SC)	19,0	40,6	4,6
Green Park (GP)	19,2	39,6	3,7
Základní škola (ZS)	19,0	41,7	4,2
Kladrubská (KL)	18,5	38,7	5,4



Obr. 22: Odhadnuté potenciální denní výpary na stanicích GP, KL, SC ZS. Rok 2015.

Dále lze z Obr. 21 vypořádat, že odhadnutý výpar na stanici Green park (GP) je systematicky vyšší, což dokládá také Tab. 7, kde jsou průměrné teploty jednotlivých stanic. Na stanici Green park byla teplota vyšší o dvě desetiny stupně Celsia oproti stanicím na Sportcentru (SC) a Základní škole (ZS). To by mohlo být způsobeno odvětráváním průmyslové haly na její střechnu do blízkosti prováděného měření.

V Tab. 8 jsou vypočtené čtrnáctidenní maximální, minimální a celkové potenciální výpary. Dokládá to opět skutečnost, že nejvyšší výpar potenciálně mohl nastat v červenci, kdy je odhadnutá velikost výparu za 14 dní více než 80 mm, kdežto v dubnu je výpar za stejně dlouhé období poloviční.

Tab. 8: Statistiky z vypočtených výparů jednotlivých stanic GP, KL, SC a ZS v povodí Letňany, rok 2015. Počet hodnot značí, kolik bylo k dispozici dnů s dostatkem naměřených teplot vzduchu.

období	statistika	GP	KL	SC	ZS	období	statistika	GP	KL	SC	ZS
1.4. - 14.4.	Počet dat	2	0	1	1	24.6. - 7.7.	Počet dat	14	14	0	14
	Max.	2,9		3,6	3,1		Max.	8,6	7,8		8,3
	Min.	0,6		3,6	3,1		Min.	3,9	3,4		3,4
	suma						suma	85,8	75,0		84,5
15.4. - 28.4.	Počet dat	14	1	6	14	8.7. - 21.7.	Počet dat	14	14	9	14
	Max.	4,6	2,9	3,8	4,8		Max.	7,4	6,8	7,4	7,2
	Min.	1,8	2,9	2,1	1,4		Min.	3,8	3,5	3,1	3,5
	suma	46,3		18,6	43,7		suma	74,4	67,6	48,6	71,8
29.4. - 12.5.	Počet dat	14	14	9	14	22.7. - 4.8.	Počet dat	13	14	14	14
	Max.	6,2	5,7	6,1	6,0		Max.	7,3	6,9	7,8	7,7
	Min.	2,4	2,1	2,6	2,1		Min.	3,9	3,5	3,7	3,7
	suma	55,6	49,7	38,6	54,4		suma	67,1	64,4	69,8	69,9
13.5. - 26.5.	Počet dat	14	14	14	14	5.8. - 18.8.	Počet dat	14	14	14	14
	Max.	5,2	4,9	5,4	5,3		Max.	7,2	6,6	7,2	7,5
	Min.	2,4	2,2	2,4	2,4		Min.	1,3	1,3	1,3	1,3
	suma	54,8	47,2	54,9	54,5		suma	76,9	70,9	76,7	78,1
27.5. - 9.6.	Počet dat	14	14	14	14	19.8. - 1.9.	Počet dat	8	14	14	14
	Max.	7,6	6,9	7,7	7,9		Max.	4,6	5,4	5,8	5,8
	Min.	1,8	1,7	1,8	1,7		Min.	2,0	1,7	1,9	1,9
	suma	66,0	60,9	66,7	65,7		suma	31,2	56,3	61,4	61,6
10.6. - 23.6.	Počet dat	14	14	10	14	2.9. - 15.9.	Počet dat	9	14	14	14
	Max.	6,2	5,5	6,4	6,6		Max.	3,7	3,4	3,7	3,6
	Min.	3,0	2,7	2,3	2,8		Min.	1,7	1,6	1,8	1,8
	suma	61,4	54,2	45,3	60,4		suma	25,9	35,7	38,8	39,3

Protože byla k dispozici data denních teplot z roku 2014 ze stanice Praha Kbely, která je vzdálena vzdušnou čarou cca 5 km od středu (uzlového bodu) povodí Mratínského potoka, byla tato data použita pro srovnání. V Tab. 9 jsou sumy z vypočtených denních potenciálních výparů, pro období od 5. května do 17. září jak stanic z povodí Mratínského povodí v Letňanech (rok 2015) tak ze stanice Praha Kbely (rok 2014). Z Tab. 9 je vidět, že ve stanici Praha Kbely byl v roce 2014 potenciální výpar nižší o 18 % oproti průměru ze stanic z Letňan v roce 2015. To pravděpodobně potvrzuje, že rok 2015 byl nadprůměrně teplý. Avšak vzhledem k tomu, že se jedná pouze o vypočtené potenciální výpary, nikoli o aktuální, jaká byla skutečná evapotranspirace nelze říci.

Tab. 9: Odhadnuté potenciální výpary za období 5. května až 17. září 2015 vypočtené z denních potenciálních výparů stanic GP, KL, SC, ZS na povodí Letňany pro rok 2015 a stanice Praha-Kbely pro rok 2014. Počet měřených dnů, je počet dnů pro, který byly dostupné denní teploty a z nich vypočtené potenciální denní výpary. Ekvivalentní výpar je výpar za celé období, kde jsou chybějící dny doplněny průměrným denním výparem dané stanice.

stanice	GP	KL	SC	ZS	KBELY
počet měřených dnů	124	136	113	136	123
potenciální výpar za měřené dny [mm]	586,8	571,2	504,7*	628,6	68,2
ekvivalentní výpar za 136 dní (mm)	643,6	626,4	553,6*	689,4	513,5

*chybějící data z července (měsíc, kdy byl prokázán největší potenciální výpar)

5.2 Zpracování dat z překlopných srážkoměrů

Jak již bylo uvedeno výše, srážkoměrů bylo v povodí umístěno celkem sedm, a to na pěti stanovištích. Z tohoto důvodu je zpracování dat rozděleno do dvou kapitol. První je věnována zpracování dat ze zdvojených srážkoměrů, a ve druhé kapitole je provedeno srovnání srážkoměrů z různých stanovišť s cílem posoudit prostorovou variabilitu měření srážek na zkoumaném povodí.

5.2.1 Data duplicitních srážkoměrů

Pro zjištění správné funkce srážkoměrů na stejných místech, tedy srážkoměrů zdvojených, byla použita desetiminutová agregovaná data. Pro účely srovnání a případné identifikace experimentálních problémů byla považována za dostatečná.

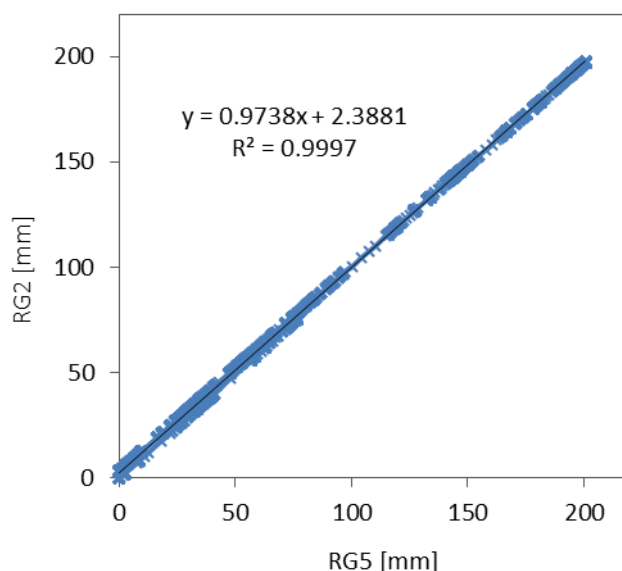
Pro toto srovnání byla zvolena korelační analýza. Korelační analýza se zabývá mírou závislosti náhodných dat. Standardním výstupem korelační analýzy je koeficient popisující míru závislosti – nejčastěji korelační koeficient R nebo koeficient determinace R^2 . Korelační analýza obecně popisuje lineární vztahy mezi veličinami [21].

3.2.2.5. RG2 a RG5 Sport Centrum

Srážkoměry RG2 a RG5 byly umístěny na střechu Sport Centra Praha v Tupolevově ulici. Jejich společná časová řada je od 1. do 27. července roku 2014 a dále od 1. dubna do 30. září 2015. Ve zkoumaném období v roce 2014 byly nalezeny dva rozpory v datech ze srážkoměru RG2. Oba rozpory nastaly dne 29. července, což bylo v době, kdy podle záznamů probíhala kontrola a sběr dat ze srážkoměru. Proto byly tyto hodnoty vyřazeny. Srážkoměr RG5 navíc od 28. do 30. července 18:30 roku 2014 prokazatelně nefungoval správně. Společná upravená, očištěná data použitá do analýzy jsou tedy od 1. do 27. července a od 30. července až do 30. listopadu 2014. V roce 2015 jsou do 5. května zjevně chybná data ze srážkoměru RG5. RG5 v tomto období registroval pouze jednu vysokou hodnotu, kterou RG2 nezaznamenal. Dále potom zaznamenal tři dešťové epizody stejně jako RG2 a posléze byl opět zjevně mimo provoz (Obr. 6).

2014

Na Obr. 23 je vykreslena součtová čára srážkových intenzit. Ke konstrukci součtové čáry byla použita data, ze kterých byly odstraněny výše uvedené evidentně chybné hodnoty (očištěná data). Součtová čára je navíc proložena regresní přímkou. Sklon přímky p je 0,9738 a koeficient determinace R^2 je 0,9997, tedy téměř jedna, proto lze říci, že jsou data téměř identická. Pokud se použijí všechna data koeficient determinace je $R^2 = 0,9851$, viz Tab. 10. Z Tab. 10 je zřejmé, že po vyřazení chybných hodnot se korelační koeficienty nepatrně zvýšily.



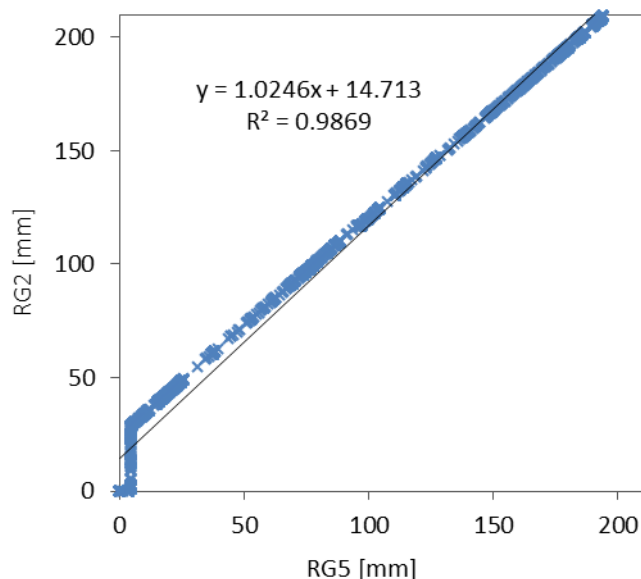
Obr. 23: Dvojná součtová čára srážkoměrů RG2 a RG5 z očištěných dat proložená směrnicí lineárního trendu, rok 2014. Srážkoměry byly umístěny na střeše Sport Centra Praha v Tupolevově ulici.

Tab. 10: Parametry regresní analýzy součtových čar pro původní a očištěná data ze srážkoměrů RG2 a RG5 za roky 2014 a 2015. Srážkoměry byly umístěny na střeše Sport Centra. (R^2 je koeficient determinace, p sklon regresní přímky a q úsek přímky vytnutý na ose y)

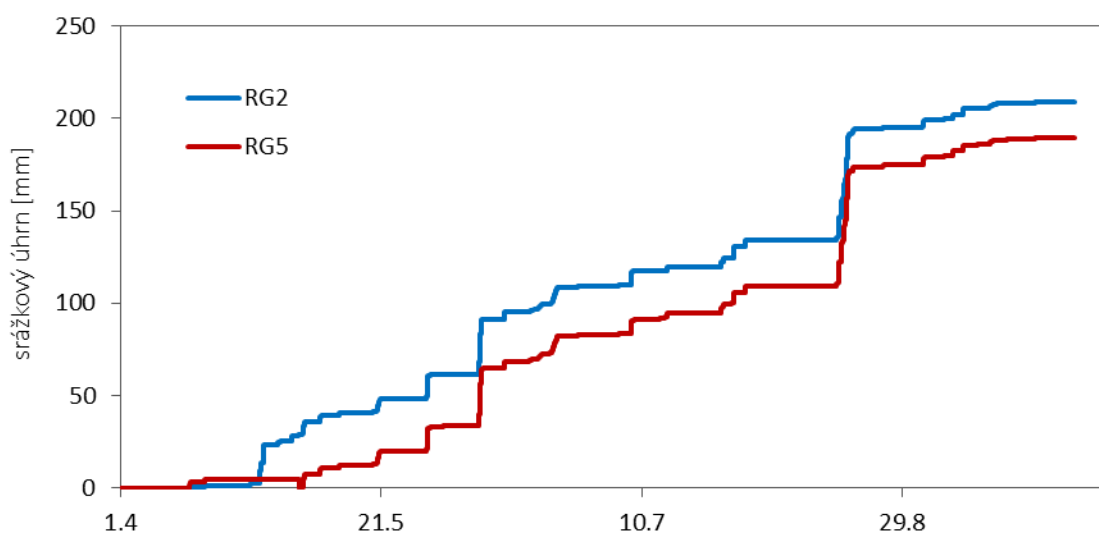
	2014		2015	
	původní data	očištěná data	původní data	očištěná data
R^2	0,9995	0,9997	0,9869	0,9999
p	0,9879	0,9738	1,0246	0,9484
q	2,4619	2,3881	14,713	0,9752

2015

Obdobně dopadlo také období z roku 2015, viz Obr. 24. Opět je jak sklon, tak koeficient determinace roven téměř jedné. Pouze úsek regresní přímky q je vyšší, viz Tab. 10. V obou případech je úsek kladný, tj. regresní přímka protíná osu y nad počátkem souřadnicových os. Protože je na ose y zobrazen srážkoměr RG2, znamená to, že srážky z něj jsou průměrně vyšší. Toto dokládá také celkový úhrn, který je za vybrané období roku 2015 209,2 mm podle RG2 a 193,9 mm podle RG5, viz Obr. 25.



Obr. 24: Dvojná součtová čára srážkoměrů RG2 a RG5 z očištěných dat proložená směrnicí lineárního trendu, rok 2015. Srážkoměry byly umístěny na střeše Sport Centra Praha v Tupolevově ulici

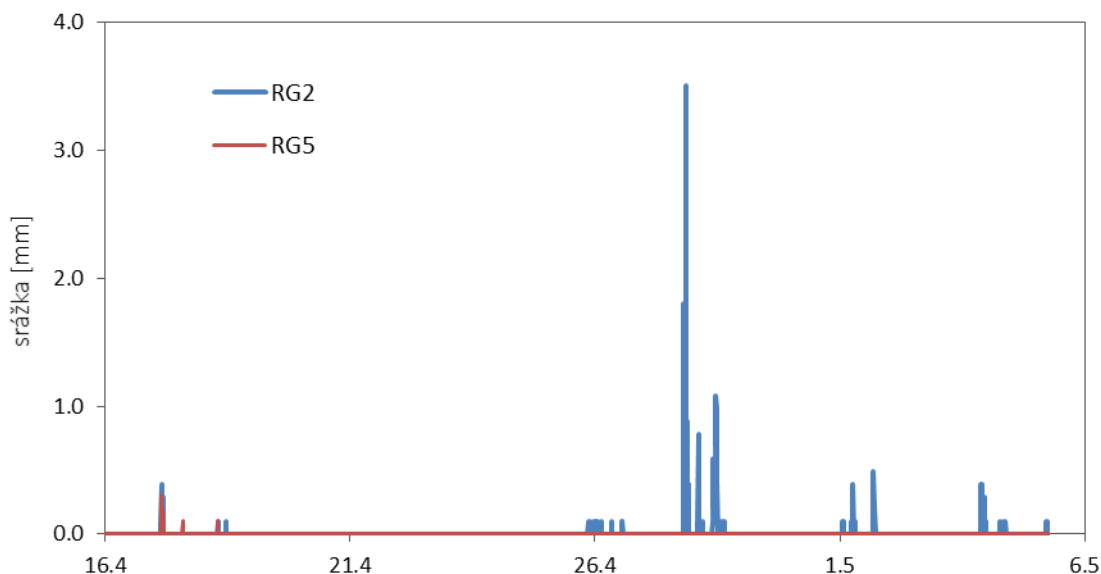


Obr. 25: Kumulativní srážka původních dat srážkoměrů RG2 a RG5, rok 2015. Srážkoměry byly umístěny na střeše Sport Centra Praha v Tupolevově ulici

Na Obr. 25, kde jsou vykresleny srážkové úhrny z obou srážkoměrů, je také vidět, že jejich posun nastal na začátku měřeného období (duben až začátek května) Srážkoměr RG5 ve čtyřech případech nezaznamenal srážku, kterou RG2 registroval (Obr. 26). Tyto srážky jsou v Tab. 11.

Tab. 11: Srážky a jejich úhrny z počátku měřeného období v roce 2015, které registroval RG2 a RG5 je nezaznamenal.

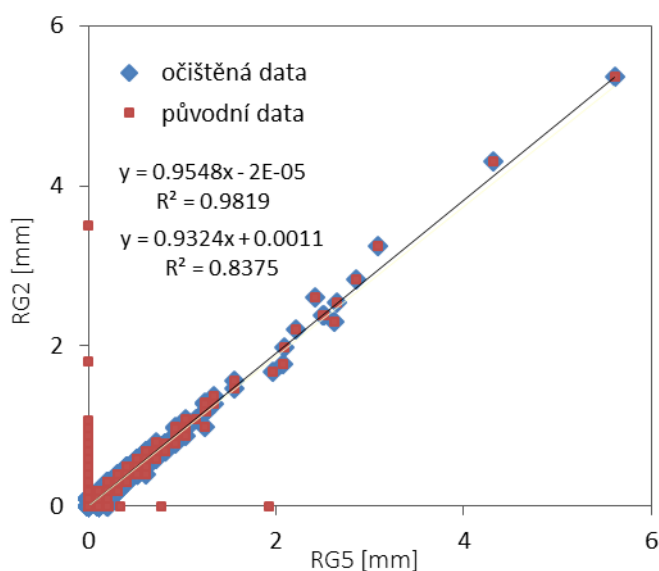
začátek srážky	konec srážky	úhrn [mm]
25. dubna 23:10 -	26. dubna 13:20	1,08
28. dubna 2:30 -	28. dubna 15:10	10,88
1. května 1:20 -	1. května 17:10	2,35
3. května 21:00 -	4. května 9:10	2,84



Obr. 26: Výpadky srážkoměru RG5 v porovnání se srážkami ze srážkoměru RG2 v období od 16. dubna do 6. května 2015. Srážkoměry byly umístěny na střeše Sport Centra v Tupolevově ulici

Pokud se pro tuto regresní analýzu použijí pouze data od 5. května 6:00 do 30. září 2015 (upravená datová řada roku 2015) koeficient determinace vychází 0,9999 a úsek regresní přímky q se výrazně sníží na 0,97. Po vyřazení chybných dat jsou tedy výsledky příznivé. Pokud správně fungovaly oba srážkoměry, zaznamenaly téměř shodné srážkové intenzity.

Na experimentální chyby citlivější analýza srážkových intenzit nedopadla tak příznivě. Na Obr. 27 jsou červeně vynesena data původní, bez výše uvedených dat, kdy RG5 nezaznamenal některé srážky, a modře data upravená (bez těchto epizod). Korelační koeficient neupravených dat je 0,91 a upravených 0,99 (Tab. 12).



Obr. 27: Proložení srážkových dat srážkoměrů RG2 a RG5 směrnicí lineárního trendu, variantně pro původní a očištěná data, rok 2015. Srážkoměry byly umístěny na střeše Sport Centra v Tupolevově ulici.

Tab. 12: Parametry regresní analýzy srážkových intenzit pro původní a očištěná data ze srážkoměrů RG2 a RG5 za roky 2014 a 2015. Srážkoměry byly umístěny na střeše Sport Centra. (R^2 je koeficient determinace, p sklon regresní přímky a q úsek přímky vytnutý na ose y)

	2014		2015	
	původní data	očištěná data	původní data	očištěná data
R^2	0,951	0,9889	0,8375	0,9819
p	0,9851	0,9853	0,9324	0,9548
q	8E-08	0,0002	0,0011	0,000002

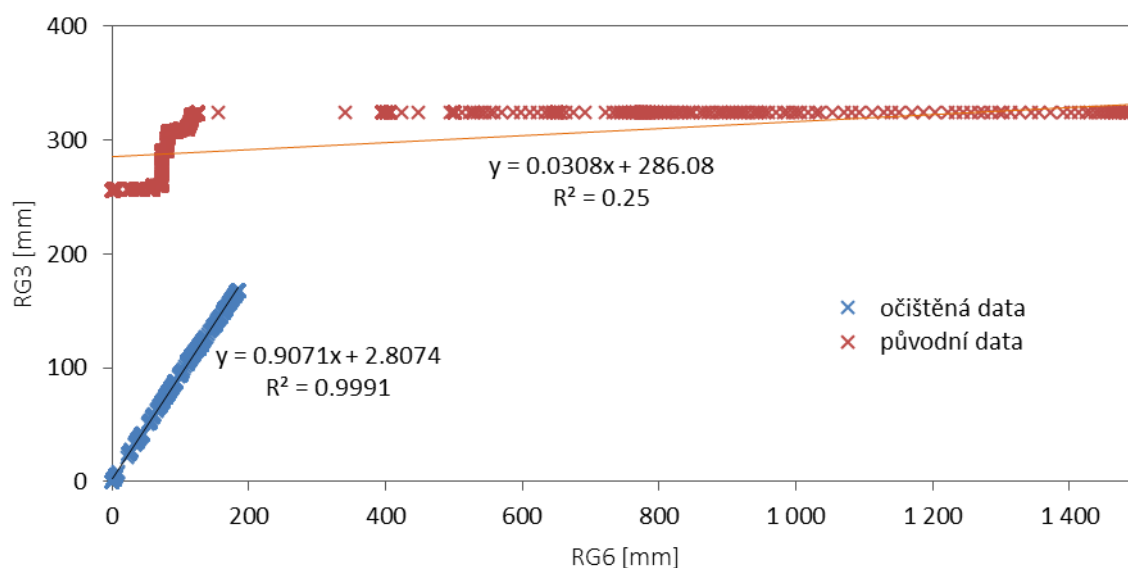
Z důvodů počátečních výpadků srážkoměru RG5, byl vybrán pro další analýzy srážkoměr RG2 společnosti PVK a.s., který má navíc delší časovou řadu.

3.2.2.6. RG3 a RG6 Green park

Srážkoměry RG3 a RG6 byly umístěny na střechu průmyslové budovy Green park ve Veselské ulici. Jedná se o logistické centrum společnosti Aston Group.

Společná datová řada těchto srážkoměrů je od 1. července 2014 do 30. listopadu 2014, z nich však byla vyřazena data od 28. srpna do 22. září 2014, protože srážkoměr RG6 v tu dobu, zjevně nebyl funkční. RG3 za toto vyřazené období naměřil srážkový úhrn téměř 90 mm, zatímco RG6 pouhé 2 mm. V roce 2015 jsou k dispozici data z obou srážkoměrů od 1. dubna až do 30. září. Jediné období vyřazené z analýzy je ze dne 2. září od 0:00 do 2:30, kdy GP6 nezaznamenal srážku o celkovém úhrnu 3,96 mm.

U těchto dvou srážkoměrů byla provedena shodná analýza jako u předchozích srážkoměrů RG2 a RG5. Na Obr. 28, kde jsou data původní a data očištěná, ze kterých byla vyfiltrována výše uvedená data. V případě původních dat vychází z korelační analýzy nevyhovující shoda. Data nekorelují ani v případě použití součtových čar (Tab. 13) tím méně v případě srážkových intenzit (Tab. 14). Koeficient determinace je v obou případech menší než 0,2.



Obr. 28: Proložení součtových čar srážkoměrů RG3 a RG6 směrnici lineárního trendu, variantně pro původní a očištěná data, rok 2014, srážkoměry byly umístěny na střeše Sport Centra v Tupolevově ulici.

Tab. 13: Výstupní koeficienty korelační analýzy ze srážkových úhrnů srážkoměrů RG3 a RG6 (R^2 je koeficient determinace, p sklon přímky a q posun přímky), srážkoměry byly umístěny na střeše Sport Centra v Tupolevově ulici.

	2014		2015	
	původní data	očištěná data	původní data	očištěná data
R^2	0,25	0,9991	0,9997	0,9819
p	0,0308	0,9071	0,9981	0,9548
q	286,08	2,8074	-0,7817	-0,0932

Tab. 14: Výstupní koeficienty korelační analýzy ze srážkových intenzit srážkoměrů RG3 a RG6 (R^2 je koeficient determinace, p sklon přímky a q posun přímky), srážkoměry byly umístěny na střeše Sport Centra v Tupolevově ulici.

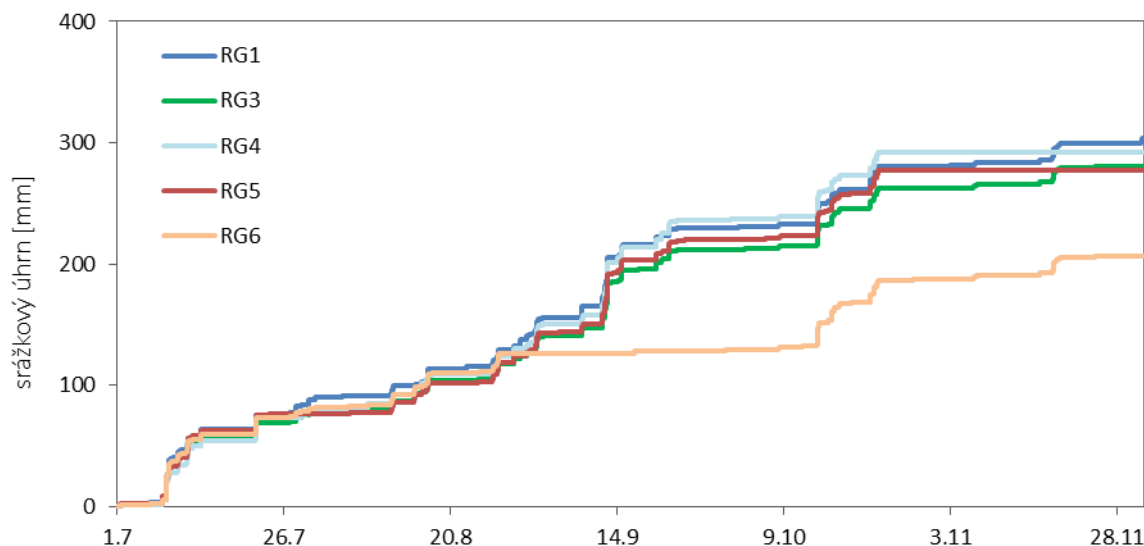
	2014		2015	
	původní data	očištěná data	původní data	očištěná data
R^2	0,00002	0,9876	0,9659	0,9752
p	0,0006	0,9746	0,9591	0,9592
q	0,0146	-0,0008	0,0004	0,0002

Po vyřazení chybných dat vyšel pro rok 2014 koeficient determinace srážkových úhrnů 0,9991 a pro rok 2015 je koeficient roven 0,9999. Z těchto výsledků lze dovodit, že při správné funkci srážkoměry zaznamenávají shodné srážky.

5.2.2 Srovnání všech srážkoměrů

Rozmístění měřících lokalit po povodí umožňuje základní posouzení prostorové variability srážek na povodí. Povodí nemá velké rozpětí nadmořských výšek. Minimální nadmořská výška v povodí je 217 m n. m. a maximální 354 m n. m. (zjištěno z digitálního modelu terénu DMR4g, dostupný na ArcGis online [[22]]). Celé povodí je urbanizované, tudíž je možné předpokládat, že vliv orografie na srážkové úhrny bude nízký. Společná data z měření srážkoměry s výjimkou RG7 a RG2 jsou k dispozici od 1. července do 30. listopadu 2014. Všechny srážkoměry disponují časovou řadou ke srovnání za období od 1. května do 30. září 2015.

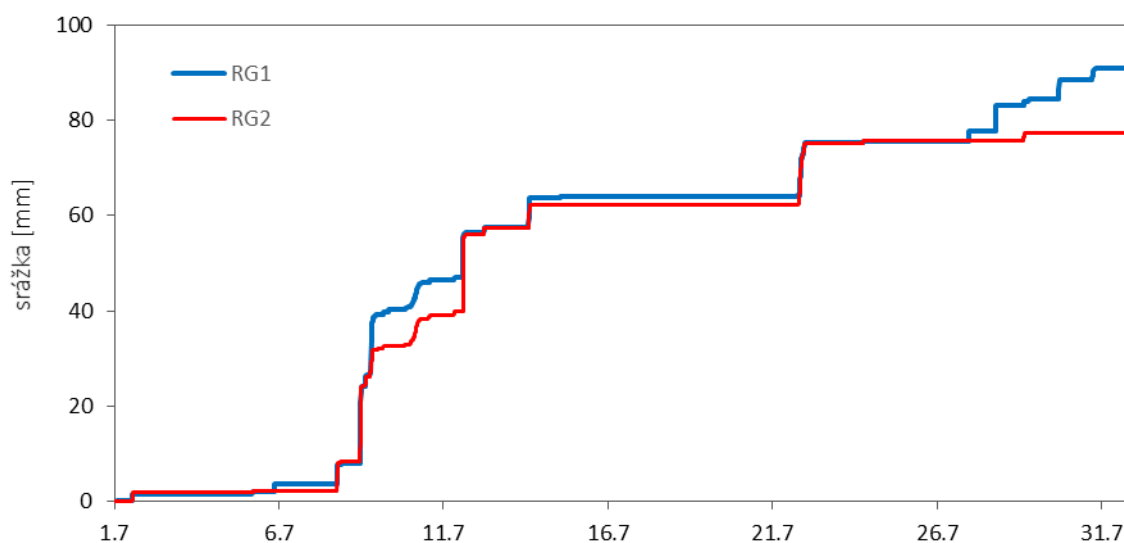
Na Obr. 29 jsou vykresleny srážkové úhrny jednotlivých srážkoměrů v období od 1. července do 30. listopadu 2014. Všechny průběhy jsou si velice podobné, kromě RG6, který má úhrn za vybrané období pouze 206 mm. To je způsobeno experimentální chybou v období od 28. srpna do 22. září 2014, viz předchozí kapitola. Srážkoměry RG1, 2, 3, 4 a 5 mají v tomto období úhrny mezi 277–310 mm tj. srážkové úhrny se od sebe vzájemně liší o méně než 12 %.



Obr. 29: Součtové čáry srážkoměrů RG1, 2, 3, 4, 5 a 6 v období červenec až listopad v roce 2014.

Dále byly srovnány vypočtené měsíční úhrny (Tab. 15). V tabulce jsou srážkoměry operované ČVUT v Praze a PVK a. s. navíc porovnány s daty ze srážkoměru ČHMÚ v Praze Kbelech. Data z tohoto srážkoměru byla získána z webových stránek amerického Národního úřadu pro oceán a atmosféru (NOAA), [23].

V Tab. 15 lze pozorovat některé diference mezi jednotlivými srážkoměry. V červenci v roce 2014 je úhrn srážek srážkoměru RG1 o 10 až 20 mm vyšší než u ostatních srážkoměrů. To znamená, že během tohoto měsíce zasáhla srážka pouze část povodí, kde byl umístěn tento srážkoměr, tedy u pozemní čerpací stanice podniku PVK a.s. v ulici U Červeného mlýnku v Praze Letňany. Tento srážkoměr je v severní části povodí a od ostatních srážkoměrů nejvzdálenější (Obr. 8). Tato situace nastala opakovaně na konci měsíce, od 27. července 2014, jak je vidět na srážkových úhrnech stanic RG1 a RG2, jejichž rozdíl je největší, viz Obr. 30.



Obr. 30: Srážkové úhrny srážkoměrů RG1 a RG2 v červenci roku 2014.

Tab. 15: Měsíční úhrny srážek měřené všemi srážkoměry v povodí v letech 2014–2015. Nula značí nulové srážky, prázdná kolonka chybějící data.

		Srážkoměrné stanice							Kbely
		RG1	RG2	RG3	RG4	RG5	RG6	RG7	
2014	duben	11,9	14,4	18,5	0	0	0		19,1
	květen	154,3	137,9	149,9	0	0	0		115,6
	červen	36,2	31,5	29,3	0	0	0		0,3
	červenec	90,7	62,9	78,2	80,0	76,5	82,3		0
	srpen	51,7	52,6	50,0	55,1	52,4	43,6		22,1
	září	87,6	87,3	84,0	101,5	91,3	3,1		88,1
	říjen	50,8	77,3	50,3	55,8	57,0	58,0		50,3
	listopad	19,2	0	17,8	0	0	19,3		19,8
	prosinec	10,7	0	9,0	0	0	0		21,3
2015	leden	0	0	0	0	0	0	0	
	únor	0	0	0	0	0	0	0	
	březen	0	0	0	0	0	0	0	
	duben	21,9	23,4	19,8	23,6	4,6	19,8	0	
	květen	36,0	37,8	37,6	37,3	33,1	37,6	30,5	25,8
	červen	41,5	48,4	51,5	56,0	50,2	51,5	37,9	44,8
	červenec	32,0	24,3	23,6	26,2	25,9	23,6	19,1	7,1
	srpen	63,0	61,4	61,9	65,2	65,8	61,9	52,8	
září	13,4	13,9	8,7	14,6	14,4	8,7	11,3		

V roce 2015 je zase z Tab. 15 vidět, že v červnu byl menší srážkový úhrn zjištěn u srážkoměru RG7. RG7 byl umístěn uprostřed povodí na střeše panelového domu v ulici Kladrubská. Po vynesení srážek nebylo zřejmé, že by některé dešťové epizody tento bod povodí nezasáhly. O něco menší naměřené úhrny mohou být v tomto případě důsledkem umístění srážkoměru na výškové budově a chybou srážkoměru vlivem unášení srážek prouděním vzduchu.

Dále byly provedeny vzájemné korelační analýzy srážkových úhrnů pro všechny srážkoměry, tedy srovnání všech srážkoměrů mezi sebou. V Tab. 16 a v Tab. 17 jsou zobrazeny koeficienty determinace této analýzy, samostatně pro oba roky 2014 a 2015. V Tab. 17 je vidět, že nejmenší korelaci s ostatními má srážkoměr RG7, který byl paradoxně umístěn uprostřed povodí, ale ve velké výšce, což měření mohlo ovlivnit. Nejlépe vzájemně korelují srážkoměry RG2 a RG3 a to v obou rocích. V roce 2015 mají tyto srážkoměry koeficient determinace velmi blízký jedné ($R^2 = 0,9995$). Tyto dvě stanice byly umístěny necelý kilometr od sebe v ulici Tupolevova (Obr. 8), proto pravděpodobně data z nich korelují nejlépe. Tohoto faktu by se dalo využít například v případě chybějících dat a nutnosti jejich doplnění.

Tab. 16: Matice koeficientů determinace jednotlivých korelačních přímků srážkových úhrnů srážkoměrů RG1, RG2, RG3 a RG4. Použita byla data od 1. července do 30. září 2014.

	RG1	RG2	RG3	RG4
RG1	1	0,9929	0,9940	0,9879
RG2	0,9929	1	0,9965	0,9945
RG3	0,9940	0,9965	1	0,9952
RG4	0,9879	0,9945	0,9952	1

Tab. 17: Matice koeficientů determinace jednotlivých korelačních přímek srážkových úhrnů srážkoměrů RG1, RG2, RG3, RG4 a RG7. Použita byla data od 1. dubna do 30. září 2015 pro vzájemné srovnání mezi srážkoměry RG1, RG2, RG3 a RG4 a v případě srovnání se srážkoměrem RG7 od 1. května do 30. září 2015.

	RG1	RG2	RG3	RG4	RG7
RG1	1	0,9929	0,9940	0,9879	0,9571
RG2	0,9969	1	0,9965	0,9945	0,9409
RG3	0,9950	0,9930	1	0,9952	0,9312
RG4	0,9963	0,9945	0,9995	1	0,9361
RG7	0,9571	0,9409	0,9312	0,9361	1

V Tab. 16 je zřejmá nižší korelace srážkoměrů RG1 a RG4, což potvrzuje skutečnost, že v červenci roku 2014 zasáhla srážka pouze část povodí, kde byl umístěn srážkoměr RG1. Vzhledem k velikosti povodí je prostorová variabilita měření srážek ve vyhodnocovaných letech 2014 a 2015 poměrně nízká. Všechny srážkoměry mají vzájemné korelační koeficienty vyšší než 0,93, což je vysoká míra korelace.

5.3 Uzlový bod povodí

Různé přístroje, které měří srážky a mají různou konstrukci, často měří jiné srážky, přestože jsou umístěny na stejném místě. Důvodem je systematická chyba měření srážek. Tato systematická chyba může být způsobena odpařování nebo smáčením. Nejzávažnějším důvodem je ztráta větrem. Vyvýšený přístroj je překážkou pro vítr a ztráta naměřených srážkových úhrnů záleží i na jeho aerodynamických vlastnostech. Kromě toho existují i jiné zdroje chyb, zejména různé použití mechanických a elektronických zařízení, druh vytápění a různé časové intervaly záznamů.

V uzlovém bodě povodí byly umístěny všechny výše zmiňované přístroje (překlopný srážkoměr RG7, laserový detektor srážek LPM, LWS senzor a tři čidla TMS). Každý z těchto přístrojů má jinou časovou řadu. Společná časová řada pro všechny tyto přístroje je od 22. května do 14. srpna. Od 14. srpna do 17. srpna jsou k dispozici data ze všech přístrojů kromě senzorů TMS. Během tohoto období od 22. května do 17. srpna přístroje zaznamenaly 8 srážek, které měly úhrn větší než 2 mm. S těmito srážkami byla provedena podrobnější analýza.

5.3.1 Začátek srážky

Každý přístroj má jinou schopnost detekce začátku srážky. Nejpřesnější je laserový detektor srážek LPM, a proto jsou začátky srážky registrované ostatními přístroji porovnávány se začátkem registrovaným LPM (Tab. 18). Laserový detektor srážek zaznamenává všechny spadlé vodní částice, takže registruje i velmi drobné mrholení o intenzitě menší než 0,01 mm/hod. Srážková epizoda ze dne 17. srpna roku 2015, která měla dle LPM dobu trvání téměř 3 hodiny, měla za první dvě hodiny trvání srážkový úhrn pouze 0,02 mm (tj., průměrná srážková intenzita 0,01 mm/hod). Tyto nízké hodnoty srážky neregistruje ani překlopný srážkoměr ani senzory vlhkosti TMS a LWS. Z tohoto důvodu byly tyto hodnoty zanedbány a vyřazeny z dalšího porovnávání.

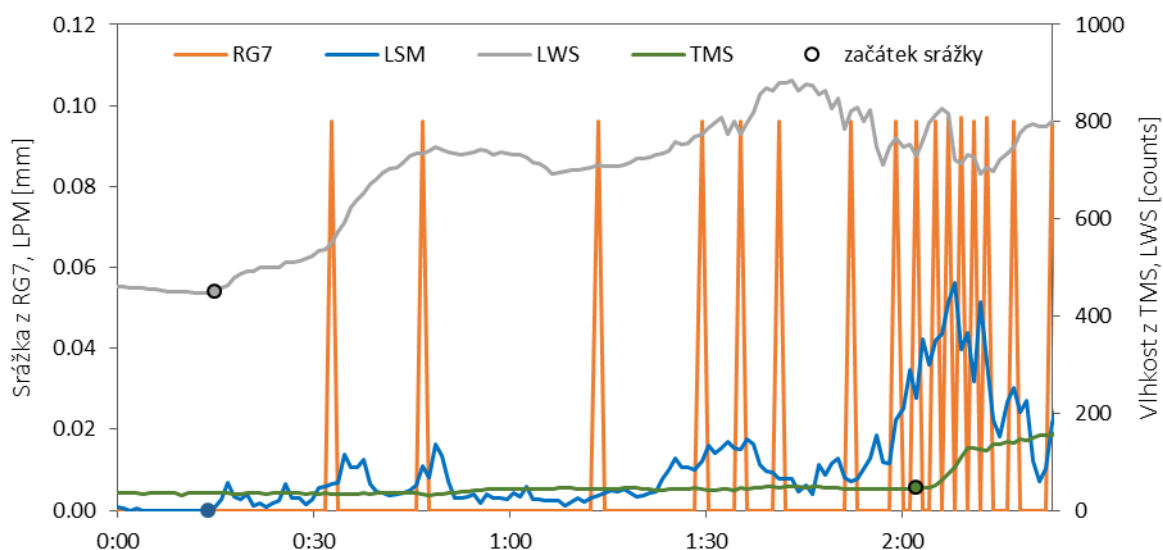
Tab. 18: Opoždění začátků srážek registrovaných přístroji RG7, LWS (variantně pro základní linii 450 a 460) a TMS (vypočtené viz kapitola zpracování dat z TMS senzorů) vůči začátkům srážek z přístroje LPM. Časy jsou v minutách. Záporné znaménko u časového údaje značí zaregistrovaný začátek dříve než začátek z přístroje LPM. Rok 2015.

		ZAČÁTEK SRÁŽKY PODLE PŘÍSTROJE			
		RG	LWS 460	LWS 440	TMS
jednotlivé srážky	8.6.	0:04	0:25	0:28	0:04
	16.8.	0:01	0:10	0:14	*
	17.8.	0:14	0:00	0:02	*
	8.7.	0:02	0:02	0:03	0:00
	23.6.	0:19	0:01	0:03	*
	29.5.	0:01	-0:01	-0:01	0:01
	29.7.	0:12	0:08	0:12	0:05
	25.7.	0:01	0:00	0:00	0:04
	Průměr	0:06	0:06	0:09	0:03

* TMS data nebyla k dispozici nebo senzor nefungoval správně.

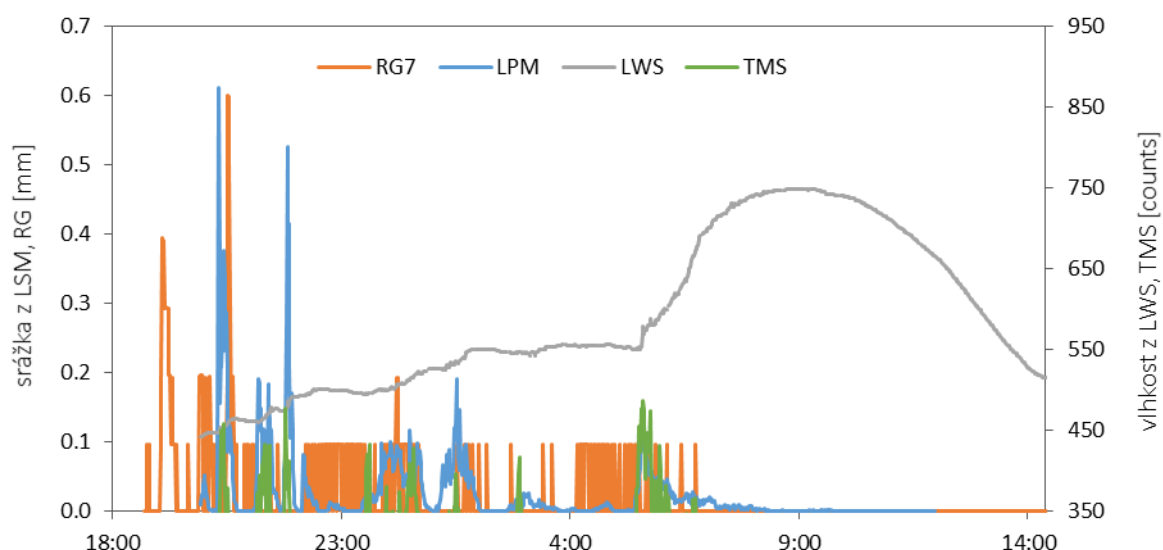
V Tab. 18 je opoždění začátků (porovnáváno s LPM) všech srážek jednotlivě a také průměr všech. Nejlépe srážku registruje senzor TMS společně s filtrem pro vyhledávání začátků srážek (kapitola 4.3.2 Identifikace počátků padajících srážek). V průměru zaznamená začátky srážek o 3 minuty později. Tento průměr je však počítán pouze z pěti srážek, protože u dvou (16. a 17. srpna roku 2015) nebyla k dispozici data a u srážky ze dne 23. června byl počátek srážky

tímto senzorem zaznamenán až 2 hodiny po všech ostatních přístrojích (Obr. 31). Tento jednotlivý výpadek byl přisouzen experimentálnímu selhání TMS senzorů.



Obr. 31: Počátky srážky z jednotlivých přístrojů (LPM, RG7, senzory LWS a TMS). Srážka ze dne 23. června roku 2015.

Obdobná situace nastala u senzoru LWS při srážce ze dne 8. června roku 2015. LWS registroval začátek srážky o 25, respektive 28 minut později než LPM při identifikaci počátku srážky při překročení hodnoty 450, respektive 460. Nezaznamenal tak počátek srážky o úhrnu téměř 0,4 mm s průměrnou intenzitou 0,1 mm/h. V tomto případě tedy senzor LWS nefungoval správně. Největší hodnoty vlhkosti zaznamenal až po srážkové události (Obr. 32). V ostatních případech LWS registruje zvýšení vlhkosti velmi přesně. Průměrně rozpozná začátek srážky o 3, respektive 6 minut později než LPM, tedy stejně přesně jako TMS.



Obr. 32: Nesprávná funkce senzoru LWS. Srážka z přístrojů RG7, LPM a senzorů LWS a TMS. Srážková ze dne 8. června roku 2015.

Zajímavou informací je, že LWS při kritériu hodnot vlhkosti 460, tj. zvýšeném prahu citlivosti pro případ kontaminace povrchu senzoru nečistotami, registruje v našem případě začátek srážkové události průměrně o 2 minuty později než při kritériu hodnot vlhkosti 450.

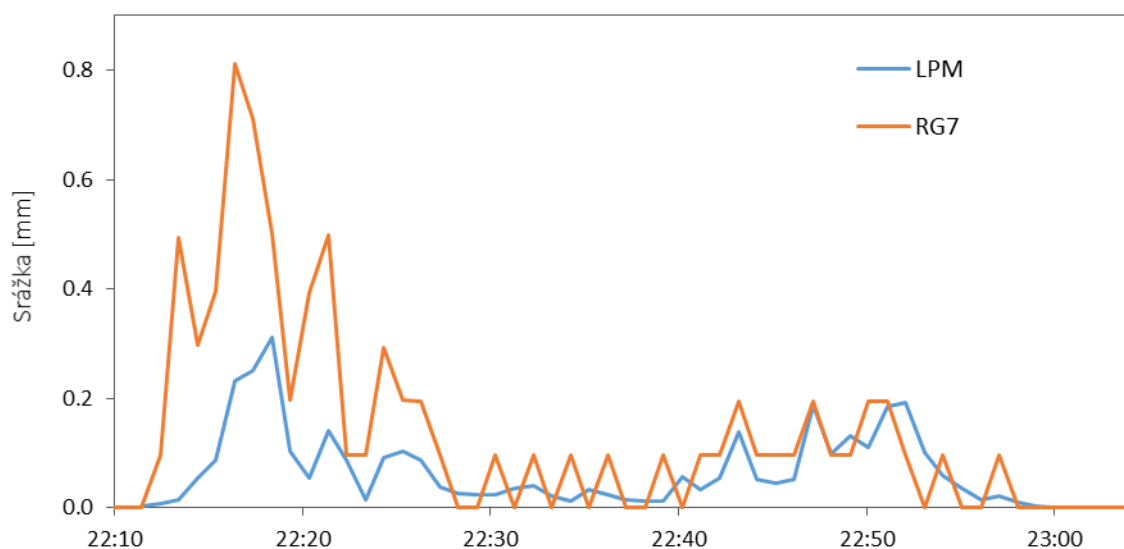
5.3.2 Konec srážky

Konec srážky udává nejpřesněji opět laserový detektor LPM. Překlopný srážkoměr RG7 z principu měření zaznamenává konec srážky dříve a to o 12 min až 2 hodiny (Tab. 19), podle intenzity konce srážkové epizody. Konce srážek z čidla TMS byly stanoveny postupem viz kapitola zpracování dat ze senzorů TMS. V průměru byl konec srážkové události stanoven pomocí TMS o 22 minut před koncem srážky dle LPM. Konce srážek mají ve většině případů malou intenzitu, a proto je v této práci používán algoritmus považuje již za schnutí čidla.

Tab. 19: Porovnání charakteristik srážek z přístrojů RG7, TMS a LPM. Zahrnuty jsou srážky o úhrnu větším než 2 mm. Rok 2015, uzlový bod Kladrubská. Chybí hodnoty u srážkové epizody ze 17. srpna, protože během ní došlo k výpadku přístroje LPM.

datum srážky	konec srážky (dříve než LPM)		srážková intenzita [mm/hod]		srážkový úhrn [mm]		doba trvání srážky
	RG	TMS	LPM	LPM	RG	LPM	LPM
			maximální	průměrná			
8.6.	2:03	0:20	36,65	1,45	23,13	23,33	14:10
16.8.	0:06		19,51	2,69	7,35	7,65	3:19
17.8.			25,95	2,45	9,34		2:57
8.7.	0:12	0:10	99,89	3,64	5,49	7,03	2:30
22.6.	0:23	0:17	5,40	1,04	4,04	4,16	4:28
29.5.	0:03	0:16	18,64	4,26	7,59	3,55	1:19
29.7.	0:19	0:21	13,87	0,53	2,62	2,21	4:39
25.7.	0:17	0:15	4,54	0,78	2,31	2,02	1:52

V Tab. 19 jsou také srážkové úhrny z přístrojů GR7 a LPM. V případě srážky ze dne 29. května je srážkový úhrn z překlopného srážkoměru více než dvojnásobný (Obr. 33). V ostatních případech se srážkové úhrny neliší o více než 20 %.



Obr. 33: Srážka z přístrojů LPM, RG7. Srážka dne 29. května roku 2015.

5.3.3 Schnutí čidel LWS a TMS

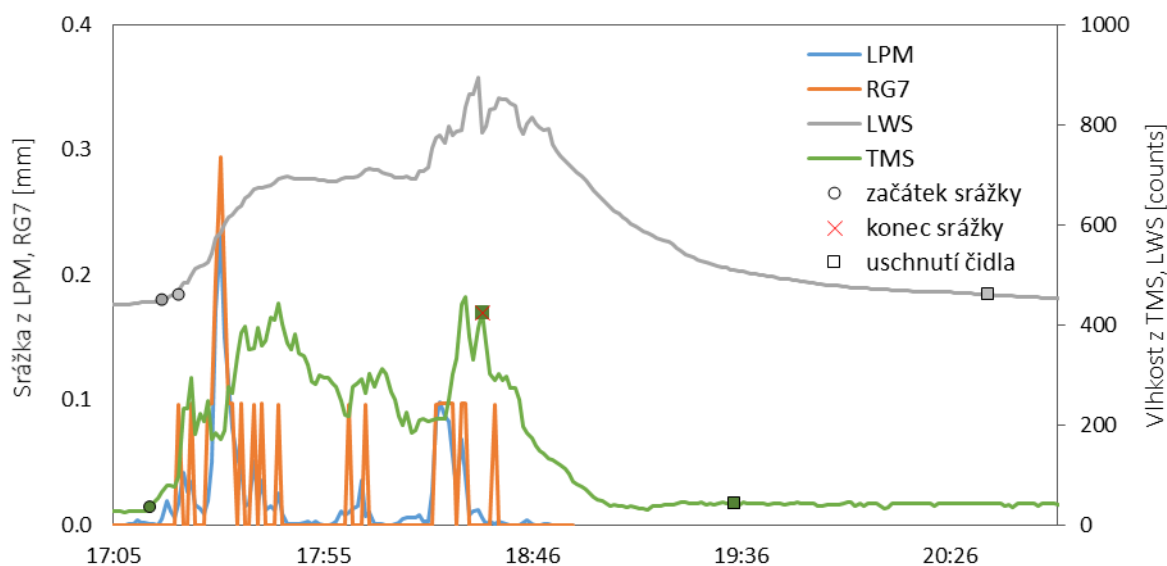
Senzor LWS schne průměrně 3, respektive 4 hodiny po konci srážky. Čidlo TMS schne významně rychleji, průměrně jednu hodinu. To může být způsobeno orientací čidla vůči světovým stranám nebo konstrukci LWS čidel která aby se podobala, co nejvíce listu mají strukturu žilkování, která znesnadňuje stečení vody a vyžaduje plné oschnutí. Na střeše panelového domu v Kladrubské ulici, byly instalovány tři TMS čidla z nichž bylo pro další porovnávání vybráno čidlo s číslem 335. Čidlo s číslem 332 osychá déle (viz kapitola 4.3.1 Srovnání senzorů TMS).

Tab. 20: Uschnutí čidel po konci srážky dle LPM pro jednotlivé srážkové epizody o úhrnu větší než 2 mm. A jejich průměr. Znaménko „-“ značí zaregistrované uschnutí čidla před koncem srážky z přístroje LPM. Rok 2015.

přístroj	Uschnutí čidla po konci srážky určené dle LPM		
	LWS 460	LWS 450	TMS
8.6.	7:56	12:04	-0:49
16.8.	6:17	8:48	
17.8.	2:56	3:12	1:20
8.7.	-0:45	-0:24	0:00
22.6.	2:24	2:36	1:38
29.5.	0:23	0:29	0:39
29.7.	1:40	2:01	0:39
25.7.	1:05	0:53	1:05
průměr	3:14	4:17	0:53

Srovnání všech přístrojů a jejich zaznamenané začátky, konce srážky a doschnutí je na Obr. 34. V tomto případě srážky ze dne 29. července roku 2015 fungovaly všechny přístroje správně a je dobře vidět, jak který reaguje. Počátky srážky všech přístrojů byly zaznamenány během pár minut po skutečném začátku srážky z LPM. Čidlo TMS osychá cca o 2 hodiny dříve než senzor LWS. Je

zde doložena také skutečnost, že přístroje RG7 a TMS registrují konec srážkové epizody dříve než LPM.



Obr. 34: Srážka z přístrojů LPM, RG7, LWS a TMS s vyznačeným začátkem, koncem srážky a uschnutím LWS a TMS. Srážka dne 29. července roku 2015.

5.4 TMS

Značnou nevýhodou čidel TMS je silná závislost měřených hodnot na teplotě vzduchu. Čidla TMS jsou původně určena k měření půdní vlhkosti. Při tomto standardním měření je tento problém řešen pomocí kalibrační křivky a také teplotní výkyvy v půdě nejsou tak výrazné jako na vzduchu. V případě nestandardního použití těchto čidel (k měření vlhkosti na vzduchu), jsou tato data v malém měřítku lineárně závislá na teplotě a dlouhodobě se tato závislost mění nelineárně, někdy i skokově. Každý přístroj, každá stanice má také jiný offset, neboli základní linii, navíc také mají čidla rozdílnou dynamiku reakcí. To je velká komplikace pro porovnávání dat z více stanic, či jejich statistické zpracování.

Velmi záleží také na natočení přístroje. Je-li umístěn vodorovně se zemským povrchem, kapky na něj dopadají kolmo a je tedy schopen začátek srážky zaznamenat okamžitě. Na druhou stranu takto orientovaný velmi pomalu schne. Je-li naopak natočen kolmo, schne velmi rychle, ale srážku zaznamená s menší intenzitou a později.

Nejpodstatnější a nejdůležitější výhodou měření tímto přístrojem je jeho cenová dostupnost.

Při analýze dat tohoto senzoru bylo prokázáno, že tato levná čidla mohou být použita jako detektory začátků a konců srážek. Jsou schopny poskytnout tyto informace s dostatečnou přesností. Čidla TMS začátky srážky detekují stejně spolehlivě jako senzory LWS od firmy Decagon Devices Inc. Konce srážky zaznamenávají s podobnou přesností jako překlopný srážkoměr. U srážek o úhrnu větším než 2 mm přibližně o 20 minut dříve. Oba přístroje nezaznamenávají déšť o malé intenzitě. To by v případě čidel TMS mohlo být odstraněno zpřísněním parametrů pro vyhledávání konce srážky, viz kapitola zpracování dat ze senzorů TMS.

6 Závěr

Ve zkoumaném povodí Mratínského potoka v Praze Letňanech bylo instalováno 7 překlopných srážkoměrů na pěti stanovištích. Dvě stanoviště se zdvojeným měřením srážkoměry od dvou provozovatelů, PVK a.s. a ČVUT v Praze byla analyzována metodou lineární regrese. Společné měřené období bylo cca od července do listopadu roku 2014 a od dubna do září roku 2015. Měřená data zdvojenými srážkoměry vykazují vysokou míru podobnosti, s koeficientem determinace vyšším než 0,98. Pro další analýzy byl v obou případech zvolen srážkoměr společnosti PVK a.s., protože měl delší časovou řadu s menším počtem výpadků.

Stanice provozované ČVUT v Praze byly vybaveny také čidly měření vlhkosti a teploty vzduchu. Z těchto dat byla v práci vypočtena extraterestriální radiace a odhadnuta potenciální denní evapotranspirace metodou Hargreaves.

Posouzení variability srážek v povodí Mratínského potoka v Praze Letňanech bylo provedeno z dat překlopných srážkoměrů z pěti stanovišť. K dispozici byla data všech srážkoměrů s výjimkou srážkoměru RG7 (umístěn v Kladrubské ulici v uzlovém bodě povodí) od července do listopadu roku 2014 a dále data všech srážkoměrů od května do září roku 2015. Srážkové úhrny jednotlivých srážkoměrů se neliší o více než 12 %. Vzájemné porovnání pomocí regresních přímk ukázalo, že nejvíce se od ostatních stanic liší srážkoměr RG7, který byl paradoxně umístěn ve středu povodí na výškové budově. Měření na této lokalitě bylo pravděpodobně výrazně ovlivněno povětrnostními podmínkami, tj. unášením srážek prouděním vzduchu.

Srovnání měření a detekce srážek různými přístroji založenými na rozdílných principech měření bylo provedeno pro datové řady z překlopných srážkoměrů, laserového detektoru srážek (LPM) a dvou nestandardních přístrojů, senzorů primárně určených k měření vlhkosti, tj. Leaf Wetness Sensors (LWS) od společnosti Decagon Devices Inc. a čidla TMS od společnosti TOMST s. r. o. Všechny tyto přístroje byly instalovány v jedné lokalitě, v uzlovém bodě povodí na výškové budově v Kladrubské ulici. Společná data ze všech čidel byla k dispozici od května do srpna roku 2015. Z tohoto období byly vybrány a podrobněji analyzovány srážky o celkovém úhrnu větším než 2 mm. Jako referenční pro účely této práce byl zvolen laserový detektor srážek. Začátky srážek detekuje nejlépe čidlo TMS při použití originálního filtru navrženého v této práci (kapitola 4.3.2). V průměru zaznamenává čidlo TMS srážky o 3 minuty později než LPM. Čidla LWS detekují začátek srážky o 3, respektive 6 minut později (variantně pro dvě prahové hodnoty udávané výrobcem). Překlopný srážkoměr zaregistruje začátek srážky v průměru nejpozději, cca 6 minut po LPM.

Konci srážek detekuje čidlo TMS při použití filtru navrženého a popsáno v této práci (kapitola 4.3.3) stejně spolehlivě jako překlopný srážkoměr, tedy v průměru o 20 minut později než LPM. Naproti tomu senzory LWS nejsou schopné poskytnout relevantní informaci o konci srážky.

LWS a TMS čidla navíc poskytují informaci o době schnutí čidel. LWS senzory schnou v průměru 3, respektive 4 hodiny, TMS čidla pouze 1 hodinu.

Možnosti dalšího zkoumání

V budoucnu by bylo zajímavé provést srovnání srážek ze všech přístrojů také pro srážky o celkovém úhrnu menším než 2 mm. Přístroje se chovají různě a mají různou schopnost detekce srážek při různých intenzitách srážkové činnosti. Výzvou by bylo rozlišení malých srážek a ranních ros.

Dalším zajímavým rozšířením práce by mohlo být posouzení potenciálu čidel LWS a TMS k odhadu intenzity srážky. Nebo porovnávání schopnosti detekce srážky čidlem TMS s filtrem s volitelnými parametry a posouzení vhodnosti zvolených prahových hodnot v případě LWS senzoru, popřípadě použití filtru využívaného pro TMS data také pro data senzorů LWS.

7 Seznam obrázků

Obr. 1: Srážkoměr s překlápěcím člunkem MR2H se záchytnou plochou 200 cm ² . Vyobrazení převzato z manuálu Meteoservis [3].	10
Obr. 2: Váhový srážkoměr MRW500. Fotografie z manuálu výrobce Meteoservis, Vodňany [3].	11
Obr. 3: Detektor deště RDH11. Vyobrazení převzato z manuálu Fiedler [5].	11
Obr. 4: Princip měření laserovým detektorem srážek. Vyobrazení převzato z manuálu výrobce Thies Clima [10].	12
Obr. 5: Překlopný srážkoměr SR03 Fiedler se záchytnou plochou 500 cm ² . Vyobrazení převzato z manuálu Fiedler [4].	13
Obr. 6: LWS senzor. Vyobrazení převzato z manuálu Decagon Devices Inc. [9].	14
Obr. 7 TMS stanice. Vyobrazení převzato z webových stránek výrobce TOMST s. r. o. [20].	16
Obr. 8: Povodí Mratínského potoka. Mapový podklad: základní mapa ČR ČÚZK poskytovaná ArcGis online [8].	17
Obr. 9: Teplota rosného bodu v uzlovém bodě v Kladrubské ulici, Praha Letňany, rok 2015.	21
Obr. 10: Surová data (závislá na teplotě) a data upravená (očištěná od vlivu teploty) z přístroje TMS335, rok 2015. Čidlo bylo umístěno na střeše panelového domu v Kladrubské ulici v uzlovém bodě povodí.	23
Obr. 11: Porovnání vlhkostí z čidel TMS 332, 335 a 336. Data z roku 2015. Čidla byla umístěna na střeše panelového domu v Kladrubské ulici v uzlovém bodě povodí. Data částečně očištěná od vlivu teploty.	23
Obr. 12: Srovnání vlhkostí čidel TMS se srážkou z laserového detektoru LPM, rok 2015. Čidla i laserový detektor LPM byla umístěna na střeše panelového domu v Kladrubské ulici v uzlovém bodě povodí. Data TMS částečně očištěná od vlivu teploty.	24
Obr. 13: Ukázka vyhlazení dat z čidla TMS 335 pomocí mediánového filtru s $A = 5$ min. Rok 2015. Minutová data jsou částečně zbavena teplotní závislosti, data vyhlazená mediánovým filtrem jsou vypočtena z minutových.	25
Obr. 14: Vyhledaný počátek srážky z mediánovým filtrem vyhlazených dat (černé kolečko) a posléze z minutových (světle modrá hvězdička). Parametr $C=2A=10$ minut. Srážka ze dne 9. května 2015 o velikosti 1,1mm (dle srážkoměru RG7, který byl umístěn na stejném místě, v uzlovém bodě povodí). Použita jsou data z čidla TMS 335.	26
Obr. 15: Počátky dešťů během jedné srážkové epizody získané pomocí mediánového filtru. Srážka ze dne 20. května 2015. Požitá data z čidla TMS 335.	26
Obr. 16: Identifikace doschnutí čidla TMS. Data z čidla TMS 335. Srážka dne 27. června roku 2015 o celkovém úhrnu 1,36 mm. Použitá kritéria byla derivace vyhlazených dat mediánovým filtrem a směrodatné odchylky vyhlazených dat mediánovým filtrem ($A = 5$ min).	28
Obr. 17: Identifikace doschnutí čidla TMS. Data z čidla TMS 335. Srážka ze dne 8. a 9. června roku 2015 o celkovém úhrnu 23,13 mm s dobou trvání 13 hodin. Použitá kritéria byla derivace vyhlazených dat mediánovým filtrem a směrodatné odchylky vyhlazených dat mediánovým filtrem ($A = 5$ min).	28
Obr. 18: Identifikace konců dešťů. Data z čidla TMS 335. Srážka ze dne 23. června roku 2015 o celkovém úhrnu 0,53 mm s dobou trvání 2,5 hodiny. Použitá kritéria byla derivace vyhlazených dat mediánovým filtrem ($A = 5$ min).	29
Obr. 19: Identifikace počátků, konců dešťů a schnutí čidel TMS. Data z čidla TMS 335. Srážka ze dne 14. července roku 2015 o celkovém úhrnu 0,27 mm s dobou trvání 4 hodiny.	30
Obr. 20: Identifikace počátků, konců dešťů a schnutí čidel TMS. Data z čidla TMS 335. Srážka dne 8. července roku 2015 o celkovém úhrnu 7,09 mm a dobou trvání 2 hodiny.	30

Obr. 21: Průměrný denní potenciální výpar stanic v povodí Letňany SC, ZS, GP a KL a extraterestriální radiace vypočtená z dat roku 2015.	31
Obr. 22: Odhadnuté potenciální denní výpary na stanicích GP, KL, SC ZS. Rok 2015.	32
Obr. 23: Dvojná součtová čára srážkoměrů RG2 a RG5 z očištěných dat proložená směrnicí lineárního trendu, rok 2014. Srážkoměry byly umístěny na střeše Sport Centra Praha v Tupolevově ulici.....	35
Obr. 24: Dvojná součtová čára srážkoměrů RG2 a RG5 z očištěných dat proložená směrnicí lineárního trendu, rok 2015. Srážkoměry byly umístěny na střeše Sport Centra Praha v Tupolevově ulici.....	36
Obr. 25: Kumulativní srážka původních dat srážkoměrů RG2 a RG5, rok 2015. Srážkoměry byly umístěny na střeše Sport Centra Praha v Tupolevově ulici	36
Obr. 26: Výpadky srážkoměru RG5 v porovnání se srážkami ze srážkoměru RG2 v období od 16. dubna do 6. května 2015. Srážkoměry byly umístěny na střeše Sport Centra v Tupolevově ulici	37
Obr. 27: Proložení srážkových dat srážkoměrů RG2 a RG5 směrnicí lineárního trendu, variantně pro původní a očištěná data, rok 2015. Srážkoměry byly umístěny na střeše Sport Centra v Tupolevově ulici.....	37
Obr. 28: Proložení součtových čar srážkoměrů RG3 a RG6 směrnicí lineárního trendu, variantně pro původní a očištěná data, rok 2014, srážkoměry byly umístěny na střeše Sport Centra v Tupolevově ulici.....	38
Obr. 29: Součtové čáry srážkoměrů RG1, 2, 3, 4, 5 a 6 v období červenec až listopad v roce 2014.	40
Obr. 30: Srážkové úhrny srážkoměrů RG1 a RG2 v červenci roku 2014.	40
Obr. 31: Počátky srážky z jednotlivých přístrojů (LPM, RG7, senzory LWS a TMS). Srážka ze dne 23. června roku 2015.	44
Obr. 32: Nesprávná funkce senzoru LWS. Srážka z přístrojů RG7, LPM a senzorů LWS a TMS. Srážková ze dne 8. června roku 2015.....	44
Obr. 33: Srážka z přístrojů LPM, RG7. Srážka dne 29. května roku 2015.	46
Obr. 34: Srážka z přístrojů LPM, RG7, LWS a TMS s vyznačeným začátkem, koncem srážky a uschnutím LWS a TMS. Srážka dne 29. července roku 2015.....	47

8 Seznam tabulek

Tab. 1: Přehled umístění srážkoměrů.....	18
Tab. 2: Časové řady překlopných srážkoměrů	18
Tab. 3: Časová řada vypočtených výparů	18
Tab. 4: Časové řady dat laserového detektoru srážek, rok 2015.....	19
Tab. 5: Datové řady LWS senzoru.....	19
Tab. 6: Souřadnice lokalit v zájmovém povodí Letňany.....	22
Tab. 7: Průměrné, maximální a minimální teploty na stanicích v období od května do září roku 2015.....	32
Tab. 8: Statistiky z vypočtených výparů jednotlivých stanic GP, KL, SC a ZS v povodí Letňany, rok 2015. Počet hodnot značí, kolik bylo k dispozici dnů s dostatkem naměřených teplot vzduchu.	33
Tab. 9: Odhadnuté potenciální výpary za období 5. května až 17. září 2015 vypočtené z denních potenciálních výparů stanic GP, KL, SC, ZS na povodí Letňany pro rok 2015 a stanice Praha-Kbely pro rok 2014. Počet měřených dnů, je počet dnů pro, který byly dostupné denní teploty a z nich vypočtené potenciální denní výpary. Ekvivalentní výpar je výpar za celé období, kde jsou chybějící dny doplněny průměrným denním výparem dané stanice.	34
Tab. 10: Parametry regresní analýzy součtových čar pro původní a očištěná data ze srážkoměrů RG2 a RG5 za roky 2014 a 2015. Srážkoměry byly umístěny na střeše Sport Centra. (R^2 je koeficient determinace, p sklon regresní přímky a q úsek přímky vytnutý na ose y)	35
Tab. 11: Srážky a jejich úhrny z počátku měřeného období v roce 2015, které registroval RG2 a RG5 je nezaznamenal.	36
Tab. 12: Parametry regresní analýzy srážkových intenzit pro původní a očištěná data ze srážkoměrů RG2 a RG5 za roky 2014 a 2015. Srážkoměry byly umístěny na střeše Sport Centra. (R^2 je koeficient determinace, p sklon regresní přímky a q úsek přímky vytnutý na ose y)	38
Tab. 13: Výstupní koeficienty korelační analýzy ze srážkových úhrnů srážkoměrů RG3 a RG6 (R^2 je koeficient determinace, p sklon přímky a q posun přímky), srážkoměry byly umístěny na střeše Sport Centra v Tupolevově ulici.	39
Tab. 14: Výstupní koeficienty korelační analýzy ze srážkových intenzit srážkoměrů RG3 a RG6 (R^2 je koeficient determinace, p sklon přímky a q posun přímky), srážkoměry byly umístěny na střeše Sport Centra v Tupolevově ulici.	39
Tab. 15: Měsíční úhrny srážek měřené všemi srážkoměry v povodí v letech 2014–2015. Nula značí nulové srážky, prázdná kolonka chybějící data.....	41
Tab. 16: Matice koeficientů determinace jednotlivých korelačních přímek srážkových úhrnů srážkoměrů RG1, RG2, RG3 a RG4. Použita byla data od 1. července do 30. září 2014.	41
Tab. 17: Matice koeficientů determinace jednotlivých korelačních přímek srážkových úhrnů srážkoměrů RG1, RG2, RG3, RG4 a RG7. Použita byla data od 1. dubna do 30. září 2015 pro vzájemné srovnání mezi srážkoměry RG1, RG2, RG3 a RG4 a v případě srovnání se srážkoměrem RG7 od 1. května do 30. září 2015.	42
Tab. 18: Opoždění začátků srážek registrovaných přístroji RG7, LWS (variantně pro základní linii 450 a 460) a TMS (vypočtené viz kapitola zpracování dat z TMS senzorů) vůči začátkům srážek z přístroje LPM. Časy jsou v minutách. Záporné znaménko u časového údaje značí zaregistrovaný začátek dříve než začátek z přístroje LPM. Rok 2015.....	43
Tab. 19: Porovnání charakteristik srážek z přístrojů RG7, TMS a LPM. Zahrnuty jsou srážky o úhrnu větším než 2 mm. Rok 2015, uzlový bod Kladrubská. Chybí hodnoty u srážkové epizody ze 17. srpna, protože během ní došlo k výpadku přístroje LPM.	45

Tab. 20: Uschnutí čidel po konci srážky dle LPM pro jednotlivé srážkové epizody o úhrnu větší než 2 mm. A jejich průměr. Znaménko „-“ značí zaregistrované uschnutí čidla před koncem srážky z přístroje LPM. Rok 2015..... 46

9 Reference

- [1] X. C. Liu, T. C. Gao, and L. Liu. A comparison of rainfall measurements from multiple instruments. *Atmos. Meas. Tech.* China: College of Meteorology and Oceanography, PLA University of Science and Technology, 2013, **6**, 1585–1595. DOI: 10.5194/amt-6-1585-2013.
- [2] Lanza, L., Leroy, M., van der Meulen, J. and Ondras, M., 2005. The WMO laboratory intercomparison of rainfall intensity gauges, Instruments and observing methods, Rep. 82, WMO/TD No. 82, 8 p., (CD). World Meteorol. Org., WMO Geneva
- [3] *Meteoservis: srážkoměry* [online]. [cit. 2016-05-07]. Dostupné z: <http://www.meteoservis.cz/57-SRAZKOMERY>
- [4] Fiedler AMS s.r.o elektronika pro ekkologii. *Člunkové srážkoměry 500 cm²,SR03,SR03/V: návod k obsluze-verze 1.04*. 2015.
- [5] *Fiedler-magr: produkty* [online]. [cit. 2016-05-07]. Dostupné z: <http://www.fiedler-magr.cz/cs/produkty/senzory-sn-ma-e-meteorologick-stanice/de-ov-sr-ky/detektor-de-t>
- [6] DIBAVOD [online]. [cit. 2016-04-06]. Dostupné z: <http://www.dibavod.cz/27/struktura-dibavod.html>
- [7] VÚV T.G.Masaryka [online]. [cit. 2016-04-06]. Dostupné z: <http://www.vuv.cz>
- [8] ČÚZK Český úřad zeměměřický a katastrální: *Geografické podklady* [online]. Copyright © 2014 ČÚZK [cit. 2016-05-14]. Dostupné z: <http://www.cuzk.cz/Zememericctvi/Geograficke-podklady/Tistene-mapy/Zakladni-mapy-strednich-meritek.aspx>
- [9] Decagon Devices, Inc. *Dielectric Leaf Wetness Sensor: Operator's Manual*. 2014.
- [10] Adolf Thies GmbH & Co. KG. *Laser Precipitation Monitor: Instruction for use, 5.4110.xx.x00 V2.4x STD*.
- [11] Kemel, M., *Klimatologie, Meteorologie, Hydrologie*, ČVUT, 2000.
- [12] Monteith, J L (1965) *Evaporation and the environment*. In: The state and movement of water in living organisms, XIXth Symposium. Soc. of Exp. Biol., Swansea, Cambridge University Press, 205-234.
- [13] Penman, H L (1948) *Natural evaporation from open water, bare soil and grass*. Proc. Roy. Soc. London, A193, 120-146
- [14] Hargreaves, G H and Samani, Z A (1985) Reference crop evapotranspiration from temperature. *Applied Eng. in Agric.*, 1(2), 96-99
- [15] Mapy.cz [online]. [cit. 2016-04-06]. Dostupné z: <https://mapy.cz>
- [16] *Matlab* [online]. [cit. 2016-05-03]. Dostupné z: <http://www.mathworks.com/products/matlab/>
- [17] ALLEN, Richard G., et al. *Cropevapotranspiration-Guidelinesforcomputingcropwaterrequirements-FAO Irrigation and drainagepaper 56*. FAO, Rome, 1998, 300.9: D05109.
- [18] DVOŘÁK, P.: *Zlepšení metod předpovědi termické konvekce pro účely letecké meteorologie*, rigorózní práce, ČHMÚ Praha, 2008
- [19] Sanda, M., et al. "Measurements of heat fluxes and soil moisture patterns in the field conditions." *AGU Fall Meeting Abstracts*. Vol. 1. 2011.
- [20] *TOMST* [online]. [cit. 2016-04-18]. Dostupné z: <http://tomst.com/web/cz/systemy/tms/>
- [21] David MILDE. *Lineární regrese: Lineární regresní model*. Přírodovědecká fakulta Univerzity Palackého v Olomouci: Chemometrie I (ACH/CHEX1), 2011.

- [22] *Geoportal.cuzk: IMAGE služba AGS - DMR 4G* [online]. Praha: ČÚZK, 2010 [cit. 2016-05-14]. Dostupné z:
[http://geoportal.cuzk.cz/\(S\(mtwxdtes054hggwh2axrrjc2\)\)/Default.aspx?mode=TextMeta&side=wms.AGS&metadataID=CZ-CUZK-AGS-DMR4G&metadataXSL=metadata.sluzba&head_tab=sekce-03-gp&menu=3143](http://geoportal.cuzk.cz/(S(mtwxdtes054hggwh2axrrjc2))/Default.aspx?mode=TextMeta&side=wms.AGS&metadataID=CZ-CUZK-AGS-DMR4G&metadataXSL=metadata.sluzba&head_tab=sekce-03-gp&menu=3143)
- [23] *NOAA: Weather* [online]. [cit. 2016-04-20]. Dostupné z: <http://www.noaa.gov/weather>